

# Untersuchungen an Blitzschutzerdungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Schrittspannung

Vom Fachbereich 18  
– Elektrotechnik und Informationstechnik –  
der Technischen Universität Darmstadt

zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte

**Dissertation**

**Dipl.-Ing. Sebastian Suchanek**  
geb. in Aschaffenburg

Referent:	Prof. Dr.-Ing. V. Hinrichsen
Korreferent:	Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. S. Pack
Tag der Einreichung:	18. 6. 2013
Tag der mündlichen Prüfung:	11. 12. 2013

D 17  
Darmstadt 2014

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-37354

URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/3735>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt.

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

[tuprints@ulb.tu-darmstadt.de](mailto:tuprints@ulb.tu-darmstadt.de)

Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

*Namensnennung - Keine kommerzielle Nutzung - Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland*



<http://creativecommons.org/licences/by-nc-nd/3.0/de/>

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Hochspannungstechnik der Technischen Universität Darmstadt. Mein erster Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. V. Hinrichsen, der mich als Doktorvater während des Forschungsprojektes stets unterstützt hat.

Herrn Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. S. Pack vom Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der Technischen Universität Graz danke ich für die bereitwillige Übernahme des Korreferats sowie für seine Hinweise und Anmerkungen.

Des Weiteren danke ich der Firma DEHN + SÖHNE GmbH + Co. KG., welche das der Arbeit zugrunde liegende Forschungsprojekt finanziell unterstützt, mir dabei aber auch sehr große wissenschaftliche Freiheit eingeräumt hat. Besonderer Dank gilt dabei Herrn Dr.-Ing. R. Brocke und Herrn Dipl.-Ing. K.-P. Müller, welche meine Haupt-Ansprechpartner bei der Fa. Dehn waren, für die zahlreichen anregenden fachlichen Diskussionen.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. J. Kupfer für seine fachliche Expertise zu medizinischen Fragen und seine Anregungen.

Mein Dank gilt ebenso Frau Prof. Dr.-Ing. I. Munteanu und Herrn Dr.-Ing. J. Gao vom Institut „Theorie Elektromagnetischer Felder“ für die Zusammenarbeit, welche nicht nur die für das Forschungsprojekt wichtigen *HUGO*-Simulationen, sondern auch Rat und Tat bei vielen anderen simulationstechnischen Fragestellungen umfasste.

Ich möchte mich auch bei allen Kolleginnen und Kollegen des Fachgebiets Hochspannungstechnik bedanken, deren lockerer Meinungs- und Gedankenaustausch ebenfalls Impulse für das Forschungsprojekt lieferte. Insbesondere möchte ich mich bei denjenigen von ihnen bedanken, die sich die Mühe gemacht haben, mein Manuskript vorab zu lesen und mir Rückmeldungen und Anregungen dazu zu geben.

Mein besonderer Dank gilt schließlich meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, welche mich während meiner Ausbildung, meines Studiums und meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter auf vielfältige Weise unterstützt haben und mir somit die Promotion schließlich überhaupt ermöglicht haben.

Stockstadt/Main, im Juni 2013  
Sebastian Suchanek





# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XVII</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>XIX</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Blitze – Entstehung, Häufigkeit, Parameter</b>	<b>3</b>
2.1. Entstehung und Häufigkeit . . . . .	3
2.2. Blitzparameter . . . . .	6
<b>3. Stand des Wissens und der Normung</b>	<b>11</b>
3.1. Aktueller Stand des Wissens . . . . .	11
3.1.1. Grundlagen zur Schrittspannung . . . . .	11
3.1.2. Erdungsberechnung . . . . .	13
3.1.3. Experimentelle Untersuchungen . . . . .	14
3.1.4. Bodenionisation . . . . .	14
3.2. Aktueller Stand der Normung . . . . .	15
3.2.1. Blitzschutznormung . . . . .	15
3.2.2. Erdungsnormung für Mittel- und Hochspannungsanlagen . . .	20
3.2.3. Elektrotechniknormen zur Strom-Wirkung auf Menschen . . .	21
<b>4. Motivation und Ziele der Arbeit</b>	<b>23</b>
<b>5. Medizinische Aspekte</b>	<b>27</b>
5.1. Allgemeine Auswirkungen des elektrischen Stromes auf den menschli- chen Körper . . . . .	27
5.1.1. Wärmewirkung . . . . .	28
5.1.2. Reizwirkung . . . . .	28
5.2. Besonderheiten des Herzens . . . . .	31
5.2.1. Reizleitungssystem des Herzens . . . . .	32
5.2.2. Entstehung und Auswirkung von Herzkammerflimmern . . . .	33
5.2.3. Herzstromfaktoren . . . . .	36
5.3. Elektrischer Widerstand des menschlichen Körpers . . . . .	37

5.4.	Sonstige Aspekte . . . . .	41
5.4.1.	Arten von Blitzunfällen . . . . .	41
5.4.2.	Weitere gesundheitliche Folgen von Blitzunfällen . . . . .	43
5.5.	Herleitung eines Schrittspannungs-Grenzwertes . . . . .	44
5.5.1.	Bestimmung nach IEC 60479 . . . . .	45
5.5.2.	Bestimmung nach Neuhaus . . . . .	46
5.5.3.	Bestimmung nach Dalziel . . . . .	46
5.5.4.	Festlegung mittels Körperstromsimulation . . . . .	47
5.5.5.	Zusammenfassung und Bewertung . . . . .	54
<b>6.</b>	<b>Voruntersuchungen und Plausibilitätskontrolle des Simulationsmodells</b>	<b>57</b>
6.1.	Allgemeines zum Simulationsmodell . . . . .	57
6.1.1.	Verwendete Simulationssoftware . . . . .	57
6.1.2.	Geometrische Abmessungen . . . . .	58
6.1.3.	Bodeneigenschaften und Bodenionisation . . . . .	60
6.1.4.	Auswertung der Simulationen . . . . .	62
6.2.	Voruntersuchungen . . . . .	67
6.2.1.	Vergleich von stationärer und transients Simulation . . . . .	67
6.2.2.	Einfluss von Kellerwänden und Betonarmierungen . . . . .	75
6.2.3.	Einfluss der Größe des Simulationsgebiets . . . . .	79
6.2.4.	Orte höchster Schrittspannungen . . . . .	81
6.2.5.	Einfluss ungleichmäßiger Stromaufteilung . . . . .	90
6.2.6.	Parameterstudie . . . . .	91
6.3.	Validierung des Simulationsmodells . . . . .	94
6.3.1.	Analytische Überprüfung . . . . .	94
6.3.2.	Überprüfung mit einer zweiten Simulationssoftware . . . . .	97
<b>7.</b>	<b>Simulation von Erdungsanlagen</b>	<b>101</b>
7.1.	Konventionelle Erdungskonzepte . . . . .	101
7.1.1.	Fundamenterder . . . . .	101
7.1.2.	Ringerder gemäß VDE 0185-305 . . . . .	102
7.1.3.	Tiefenerder . . . . .	108
7.1.4.	Schrägerder . . . . .	116
7.2.	Nichtkonventionelle Erdungskonzepte . . . . .	124
7.2.1.	Variationen von Ringerdern . . . . .	124
7.2.2.	Nach innen geneigte Schrägerder . . . . .	130
7.2.3.	Sternförmige Erder . . . . .	136
7.2.4.	Elektrisch nicht angebundene Ringerder . . . . .	142
7.2.5.	Leiterbögen an den Ecken eines Fundamenterders . . . . .	143
7.2.6.	Tiefliegender Ringerder . . . . .	145
7.2.7.	Lokale Isolierungen an den Ecken eines Fundamenterders . . . . .	147
7.2.8.	Bodenverbessernde Maßnahmen unter dem Fundament . . . . .	148

<b>8. Diskussion der Simulationsergebnisse und Ableitung von Regeln</b>	<b>151</b>
8.1. Wirksamkeitsmatrix . . . . .	151
8.2. Diskussion der Ergebnisse . . . . .	155
8.3. Allgemeine Regeln zur Auslegung von Blitzschutz-Erdungsanlagen .	159
<b>9. Sonderfälle</b>	<b>161</b>
9.1. Windkraftanlagen . . . . .	161
9.2. Schutzhütten . . . . .	164
<b>10. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>167</b>
<b>Anhang</b>	<b>171</b>
<b>A. Quellcode des verwendeten Skriptes</b>	<b>173</b>
A.1. Funktionsbeschreibung . . . . .	173
A.2. Quellcode . . . . .	174
<b>B. Zusätzliche Graphen</b>	<b>177</b>
B.1. Leerlaufende und tatsächliche Schrittspannung . . . . .	177
B.2. Konventionelle Erdungskonzepte . . . . .	181
B.3. Nichtkonventionelle Erdungskonzepte . . . . .	226
B.4. Sonderfälle . . . . .	246
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>253</b>
<b>Relevante Normen</b>	<b>265</b>
<b>Lebenslauf</b>	<b>269</b>
<b>Veröffentlichungen</b>	<b>271</b>
<b>Erklärung laut § 9 PromO</b>	<b>273</b>



# Abbildungsverzeichnis

2.1. Schematischer Aufbau einer Gewitterwolke . . . . .	4
2.2. Unterschiedliche Typen von Wolke-Erde- und Erde-Wolke-Blitzen . .	5
2.3. Vorentladung und Fangentladungen . . . . .	5
2.4. Blitzdichte in Deutschland . . . . .	7
2.5. Negativer Wolke-Erde-Blitz mit mehreren Teilströmen . . . . .	8
2.6. Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Stromscheitelwert von Blitzen	9
3.1. Entstehung von Schrittspannungen . . . . .	12
3.2. Skizze zur Ausführungsempfehlung der VDE-Norm von Ringerder-Anlagen zur Schrittspannungssteuerung . . . . .	19
3.3. Zusammenhang zwischen Körperstrom, Stromflussdauer und der Auftretswahrscheinlichkeit von Herzkammerflimmern . . . . .	22
5.1. Schema der Ionenkonzentrationen und Ladungsverhältnisse an einer Zellmembran . . . . .	29
5.2. Reaktionsfähigkeit der Nervenzelle eines Frosches auf Folgeereize . . .	30
5.3. Schematischer Aufbau des menschlichen Herzens . . . . .	31
5.4. Reizleitungssystem des menschlichen Herzens . . . . .	32
5.5. Typischer Verlauf eines Elektrokardiogramms . . . . .	33
5.6. Prinzipielles Entstehen von Herzkammerflimmern . . . . .	35
5.7. Entstehen von Herzkammerflimmern durch externe Reize . . . . .	36
5.8. Verteilung der Impedanzen im menschlichen Körper . . . . .	39
5.9. Zulässige Schritt- und Berührspannungen nach NEUHAUS . . . . .	46
5.10. Modell der HUGO-Schrittspannungssimulation . . . . .	48
5.11. Schnittflächen im HUGO-Modell zur Auswertung der Herzströme . .	49
5.12. Ergebnisse der HUGO-Schrittspannungssimulation . . . . .	50
5.13. Stromstärke in Abhängigkeit der Impulsdauer für Kammerflimmern an Meerschweinchenherzen . . . . .	51
5.14. Stromstärke für Kammerflimmern in Abhängigkeit des Gewichts verschiedener Versuchstiere . . . . .	52
5.15. <i>HUGO</i> -Modell für die Simulation des Strompfades linke Hand – linker Fuß . . . . .	53
5.16. Ergebnisse des <i>HUGO</i> -Modells bei 220 V, 50 Hz als elektrische Feldstärken im Herz (aus [Gao10a]) . . . . .	54
6.1. Simulationsgebiet der Erdungssimulationen in <i>COMSOL</i> . . . . .	59
6.2. Spezifische Widerstände verschiedener Böden . . . . .	61

6.3. Funktion der Bodenleitfähigkeit $\sigma$ in Abhängigkeit vom anliegenden elektrischen Feld $E$ zur Nachbildung des Effektes der Bodenionisation in der Simulation . . . . .	61
6.4. Schrittspannungsauswertung mit und ohne Betragsbildung . . . . .	63
6.5. Bügel zur Simulation des Verhältnisses von leerlaufender zu tatsächlicher Schrittspannung in <i>COMSOL</i> . . . . .	65
6.6. Simulationsergebnisse von leerlaufender und tatsächlicher Schrittspannung bei linearem Boden mit $\varrho = 1000 \Omega\text{m}$ . . . . .	66
6.7. Strom, E-Feld und Impedanzbelag an einem Rundleiter . . . . .	69
6.8. Skin-Effekt in einem Rundleiter . . . . .	70
6.9. Ideale und verlustbehaftete Verbindungsleiter an einer Vier-Ringerder-Anlage bei Erst- und Folgeblitz . . . . .	71
6.10. Rechenzeitbedarf in Abhängigkeit der Anzahl der Gitterzellen . . . . .	74
6.11. Modellierung zweier unterschiedlicher Armierungsvarianten der Fundamentplatte in <i>COMSOL</i> . . . . .	76
6.12. Schrittspannungen bei verschiedenen Ausführungen von Armierungen der Fundamentplatte . . . . .	76
6.13. Schrittspannungen bei verschiedenen Arten von Kellerwänden . . . . .	78
6.14. Oberflächenpotential und Schrittspannungen bei Variation der Größe des Berechnungsgebietes . . . . .	80
6.15. Prinzipskizze zur analytischen Begründung der $45^\circ$ -Auswerteachsen . . . . .	82
6.16. Betrachtungspfade für Spannungen an einem quadratischen Gebäude (Draufsicht) . . . . .	84
6.17. Schrittspannungen entlang verschiedener Pfade an einem quadratischen Gebäude bei einer Vier-Ringerder-Anlage . . . . .	85
6.18. Schrittspannungen entlang verschiedener Pfade an einem quadratischen Gebäude bei vier 9-m-Tiefenerdern . . . . .	86
6.19. Betrachtungspfade für Schrittspannungen an einem rechteckigen Gebäude (Draufsicht) . . . . .	87
6.20. Schrittspannungen entlang verschiedener Pfade an einem rechteckigen Gebäude bei einer Vier-Ringerder-Anlage . . . . .	88
6.21. Schrittspannungen entlang verschiedener Pfade an einem rechteckigen Gebäude bei vier 9-m-Tiefenerdern . . . . .	89
6.22. Einfluss von gleichmäßiger und ungleichmäßiger Stromaufteilung auf mehrere Tiefenerder . . . . .	91
6.23. Schrittspannungen in Abhängigkeit der Bodenleitfähigkeit . . . . .	92
6.24. Schrittspannungen bei Abweichungen der Erderpositionen . . . . .	93
6.25. Vergleich von Simulation und analytischen Berechnungen an einem Halbkugelerder . . . . .	96
6.26. Vergleich zweier unterschiedlicher Simulationen eines Staberders . . . . .	98
7.1. Modellierung eines Fundmanterders in <i>COMSOL</i> . . . . .	102
7.2. Schrittspannungen bei Verwendung eines Fundanterders um Gebäude verschiedener Größe . . . . .	103

7.3. Schrittspannungen bei Ringerdern, Gebäude $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ , $I = 200\text{ kA}$ .	104
7.4. Schrittspannungen bei Ringerdern, Gebäude $2\text{ m} \times 5\text{ m}$ , $I = 200\text{ kA}$ .	105
7.5. Schrittspannungen bei Ringerdern, Gebäude $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ , $I = 200\text{ kA}$	106
7.6. Schrittspannungen bei Ringerdern, Gebäude $10\text{ m} \times 50\text{ m}$ , $I = 200\text{ kA}$	107
7.7. Planskizze der Tiefenverhältnisse der simulierten Staberder . . . . .	109
7.8. Planskizze der Verteilung von senkrechten Staberdern um Gebäude .	109
7.9. Planskizze zur Positionierung der Staberder außerhalb von Gebäuden	110
7.10. Schrittspannungen bei Tiefenerdern, Gebäude $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ , $I = 200\text{ kA}$	111
7.11. Schrittspannungen bei Tiefenerdern, Gebäude $2\text{ m} \times 5\text{ m}$ , $I = 200\text{ kA}$	112
7.12. Schrittspannungen bei Tiefenerdern, Gebäude $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ , $I = 200\text{ kA}$	113
7.13. Schrittspannungen bei Tiefenerdern, Gebäude $10\text{ m} \times 50\text{ m}$ , $I = 200\text{ kA}$	114
7.14. Perspektivische Darstellung der Schrägerder . . . . .	117
7.15. Planskizze der Tiefenverhältnisse der simulierten Schrägerder . . . . .	117
7.16. Planskizze zur Ausrichtung der beiden untersuchten Schrägerdertypen	118
7.17. Schrittspannungen um ein Gebäude $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ bei Schrägerdern ver- schiedener Längen . . . . .	119
7.18. Schrittspannungen um ein Gebäude $2\text{ m} \times 5\text{ m}$ bei Schrägerdern ver- schiedener Längen . . . . .	120
7.19. Schrittspannungen um ein Gebäude $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ bei Schrägerdern ver- schiedener Längen . . . . .	121
7.20. Schrittspannungen um ein Gebäude $10\text{ m} \times 50\text{ m}$ bei Schrägerdern ver- schiedener Längen . . . . .	122
7.21. Planskizze Vier-Ringerder-Anlage, Variation des horizontalen Ringab- standes $\Delta d$ . . . . .	125
7.22. Schrittspannungen um ein Gebäude mit vier Ringerdern bei Variation des horizontalen Ringabstandes . . . . .	125
7.23. Planskizze Vier-Ringerder-Anlage, Variation des vertikalen Ringab- standes $\Delta h$ . . . . .	126
7.24. Schrittspannungen um ein Gebäude mit vier Ringerdern bei Variation des vertikalen Ringabstandes . . . . .	126
7.25. Planskizze der Vier-Ringerder-Anlage bei ungleichförmiger vertikaler Verteilung der Ringe . . . . .	127
7.26. Schrittspannungen um ein Gebäude bei vier Ringerdern mit ungleich- förmiger vertikaler Verteilung der Ringe . . . . .	128
7.27. Planskizze der ungleichförmigen Verteilung der Erderringe bei weniger als vier Ringen . . . . .	129
7.28. Schrittspannungen um ein Gebäude bei weniger als vier Ringerdern mit ungleichförmiger Verteilung . . . . .	129
7.29. Verschiedene Ausführungsvarianten nach innen geneigter Schrägerder	131
7.30. Schrittspannungen um ein Gebäude $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ bei nach innen gerich- teten Schrägerdern . . . . .	132
7.31. Schrittspannungen um ein Gebäude $2\text{ m} \times 5\text{ m}$ bei nach innen gerich- teten Schrägerdern . . . . .	133

7.32. Schrittspannungen um ein Gebäude $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ bei nach innen gerichteten Schrägerdern . . . . .	134
7.33. Schrittspannungen um ein Gebäude $10\text{ m} \times 50\text{ m}$ bei nach innen gerichteten Schrägerdern . . . . .	135
7.34. Planskizze der verschiedenen Ausführungsvarianten von Sternerdern . . . . .	136
7.35. Ausführung von Sternerdern bei großen Gebäuden . . . . .	137
7.36. Schrittspannungen um ein Gebäude $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ mit Sternerdern . . . . .	138
7.37. Schrittspannungen um ein Gebäude $2\text{ m} \times 5\text{ m}$ mit Sternerdern . . . . .	139
7.38. Schrittspannungen um ein Gebäude $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ mit Sternerdern . . . . .	140
7.39. Schrittspannungen um ein Gebäude $10\text{ m} \times 50\text{ m}$ mit Sternerdern . . . . .	141
7.40. Schrittspannungen bei elektrisch nicht angebundenen Ringerdern . . . . .	142
7.41. Eckbogen am Fundamenterder zur Potentialsteuerung im <i>COMSOL</i> -Modell . . . . .	143
7.42. Schrittspannungen um ein Gebäude $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ bei einem Fundamenterder mit und ohne zusätzliche Leiterbögen an den Ecken . . . . .	144
7.43. Skizze zur Positionierung des tiefliegenden Ringerders . . . . .	145
7.44. Schrittspannungen bei Verwendung eines tiefliegenden Ringerders . . . . .	146
7.45. Nach innen versetzter Fundamenterder . . . . .	146
7.46. Ausführung einer Eckenisolierung (rot gefärbt) in <i>COMSOL</i> . . . . .	147
7.47. Schrittspannungen bei einem Fundamenterder mit isolierten Ecken . . . . .	148
7.48. Schrittspannungen bei Einsatz von Bodenverbesserern, $I = 200\text{ kA}$ . . . . .	149
8.1. Maximal auftretende Schrittspannungen bei ausgewählten Erdungsanlagen und unterschiedlichen Gebäudegrößen für $I = 200\text{ kA}$ . . . . .	154
9.1. Maßskizze des angenommenen Fundamentes einer Windkraftanlage sowie die darum positionierten Ringerder . . . . .	162
9.2. Schrittspannungen um das Fundament einer Windkraftanlage . . . . .	163
9.3. Ausführungsvarianten von Schutzhütten-Erden . . . . .	165
9.4. Schrittspannungen in und um eine(r) Schutzhütte ( $I = 200\text{ kA}$ ) . . . . .	166
B.1. Simulationsergebnisse von leerlaufender und tatsächlicher Schrittspannung bei linearem Boden mit $\varrho = 100\text{ }\Omega\text{m}$ . . . . .	178
B.2. Simulationsergebnisse von leerlaufender und tatsächlicher Schrittspannung bei linearem Boden mit $\varrho = 200\text{ }\Omega\text{m}$ . . . . .	178
B.3. Simulationsergebnisse von leerlaufender und tatsächlicher Schrittspannung bei linearem Boden mit $\varrho = 500\text{ }\Omega\text{m}$ . . . . .	179
B.4. Simulationsergebnisse von leerlaufender und tatsächlicher Schrittspannung bei linearem Boden mit $\varrho = 900\text{ }\Omega\text{m}$ . . . . .	179
B.5. Simulationsergebnisse von leerlaufender und tatsächlicher Schrittspannung bei linearem Boden mit $\varrho = 1100\text{ }\Omega\text{m}$ . . . . .	180
B.6. Simulationsergebnisse von leerlaufender und tatsächlicher Schrittspannung bei nichtlinearem Boden mit $\varrho = 100 \dots 1000\text{ }\Omega\text{m}$ . . . . .	180
B.7. Schrittspannungen bei einem Fundamenterder, Gebäude $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ . . . . .	182



B.8. Schrittspannungen bei einem Fundamenterder, Gebäude $2\text{ m} \times 5\text{ m}$ . . . . .	183
B.9. Schrittspannungen bei einem Fundamenterder, Gebäude $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ . . . . .	184
B.10. Schrittspannungen bei einem Fundamenterder, Gebäude $10\text{ m} \times 50\text{ m}$ . . . . .	185
B.11. Schrittspannungen bei einem Ringerder, Gebäude $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ . . . . .	186
B.12. Schrittspannungen bei zwei Ringerdern, Gebäude $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ . . . . .	187
B.13. Schrittspannungen bei drei Ringerdern, Gebäude $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ . . . . .	188
B.14. Schrittspannungen bei vier Ringerdern, Gebäude $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ . . . . .	189
B.15. Schrittspannungen bei einem Ringerder, Gebäude $2\text{ m} \times 5\text{ m}$ . . . . .	190
B.16. Schrittspannungen bei zwei Ringerdern, Gebäude $2\text{ m} \times 5\text{ m}$ . . . . .	191
B.17. Schrittspannungen bei drei Ringerdern, Gebäude $2\text{ m} \times 5\text{ m}$ . . . . .	192
B.18. Schrittspannungen bei vier Ringerdern, Gebäude $2\text{ m} \times 5\text{ m}$ . . . . .	193
B.19. Schrittspannungen bei einem Ringerder, Gebäude $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ . . . . .	194
B.20. Schrittspannungen bei zwei Ringerdern, Gebäude $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ . . . . .	195
B.21. Schrittspannungen bei drei Ringerdern, Gebäude $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ . . . . .	196
B.22. Schrittspannungen bei vier Ringerdern, Gebäude $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ . . . . .	197
B.23. Schrittspannungen bei einem Ringerder, Gebäude $10\text{ m} \times 50\text{ m}$ . . . . .	198
B.24. Schrittspannungen bei zwei Ringerdern, Gebäude $10\text{ m} \times 50\text{ m}$ . . . . .	199
B.25. Schrittspannungen bei drei Ringerdern, Gebäude $10\text{ m} \times 50\text{ m}$ . . . . .	200
B.26. Schrittspannungen bei vier Ringerdern, Gebäude $10\text{ m} \times 50\text{ m}$ . . . . .	201
B.27. Schrittspannungen bei Tiefenerdern im Keller beginnend, Gebäude $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ . . . . .	202
B.28. Schrittspannungen bei Tiefenerdern im Keller beginnend, Gebäude $2\text{ m} \times 5\text{ m}$ . . . . .	203
B.29. Schrittspannungen bei Tiefenerdern im Keller beginnend, Gebäude $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ . . . . .	204
B.30. Schrittspannungen bei Tiefenerdern im Keller beginnend, Gebäude $10\text{ m} \times 50\text{ m}$ . . . . .	205
B.31. Schrittspannungen bei Tiefenerdern im Keller beginnend, 1,5 m iso- liert, Gebäude $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ . . . . .	206
B.32. Schrittspannungen bei Tiefenerdern im Keller beginnend, 1,5 m iso- liert, Gebäude $2\text{ m} \times 5\text{ m}$ . . . . .	207
B.33. Schrittspannungen bei Tiefenerdern im Keller beginnend, 1,5 m iso- liert, Gebäude $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ . . . . .	208
B.34. Schrittspannungen bei Tiefenerdern im Keller beginnend, 1,5 m iso- liert, Gebäude $10\text{ m} \times 50\text{ m}$ . . . . .	209
B.35. Schrittspannungen bei Tiefenerdern im Keller beginnend, 3 m isoliert, Gebäude $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ . . . . .	210
B.36. Schrittspannungen bei Tiefenerdern im Keller beginnend, 3 m isoliert, Gebäude $2\text{ m} \times 5\text{ m}$ . . . . .	211
B.37. Schrittspannungen bei Tiefenerdern im Keller beginnend, 3 m isoliert, Gebäude $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ . . . . .	212
B.38. Schrittspannungen bei Tiefenerdern im Keller beginnend, 3 m isoliert, Gebäude $10\text{ m} \times 50\text{ m}$ . . . . .	213

B.39.Schrittspannungen bei Tiefenerdern ebenerdig beginnend, Gebäude 2 m × 2 m . . . . .	214
B.40.Schrittspannungen bei Tiefenerdern ebenerdig beginnend, Gebäude 2 m × 5 m . . . . .	215
B.41.Schrittspannungen bei Tiefenerdern ebenerdig beginnend, Gebäude 10 m × 10 m . . . . .	216
B.42.Schrittspannungen bei Tiefenerdern ebenerdig beginnend, Gebäude 10 m × 50 m . . . . .	217
B.43.Schrittspannungen bei Schrägerdern Typ 1, Gebäude 2 m × 2 m . . .	218
B.44.Schrittspannungen bei Schrägerdern Typ 1, Gebäude 2 m × 5 m . . .	219
B.45.Schrittspannungen bei Schrägerdern Typ 1, Gebäude 10 m × 10 m . .	220
B.46.Schrittspannungen bei Schrägerdern Typ 1, Gebäude 10 m × 50 m . .	221
B.47.Schrittspannungen bei Schrägerdern Typ 2, Gebäude 2 m × 2 m . . .	222
B.48.Schrittspannungen bei Schrägerdern Typ 2, Gebäude 2 m × 5 m . . .	223
B.49.Schrittspannungen bei Schrägerdern Typ 2, Gebäude 10 m × 10 m . .	224
B.50.Schrittspannungen bei Schrägerdern Typ 2, Gebäude 10 m × 50 m . .	225
B.51.Schrittspannungen bei nach innen gerichteten Schrägerdern „kreuzend“, Gebäude 2 m × 2 m . . . . .	227
B.52.Schrittspannungen bei nach innen gerichteten Schrägerdern „nicht kreuz- zend“, Gebäude 2 m × 2 m . . . . .	228
B.53.Schrittspannungen bei nach innen gerichteten Schrägerdern „kreuzend“, Gebäude 2 m × 5 m . . . . .	229
B.54.Schrittspannungen bei nach innen gerichteten Schrägerdern „nicht kreuz- zend, steil“, Gebäude 2 m × 5 m . . . . .	230
B.55.Schrittspannungen bei nach innen gerichteten Schrägerdern „nicht kreuz- zend, flach“, Gebäude 2 m × 5 m . . . . .	231
B.56.Schrittspannungen bei nach innen gerichteten Schrägerdern, Gebäude 10 m × 10 m . . . . .	232
B.57.Schrittspannungen bei nach innen gerichteten Schrägerdern, Gebäude 10 m × 50 m . . . . .	233
B.58.Schrittspannungen bei Verwendung von Sternerdern im 45°-Winkel unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude 2 m × 2 m. . . . .	234
B.59.Schrittspannungen bei Verwendung von Sternerdern im 45°-Winkel unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude 2 m × 5 m. . . . .	235
B.60.Schrittspannungen bei Verwendung von Sternerdern im 45°-Winkel unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude 10 m × 10 m. . . . .	236
B.61.Schrittspannungen bei Verwendung von Sternerdern im 45°-Winkel unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude 10 m × 50 m. . . . .	237

B.62. Schrittspannungen bei Verwendung von Sternerdern im 90°-Winkel unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude 2 m × 2 m. . . . .	238
B.63. Schrittspannungen bei Verwendung von Sternerdern im 90°-Winkel unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude 2 m × 5 m. . . . .	239
B.64. Schrittspannungen bei Verwendung von Sternerdern im 90°-Winkel unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude 10 m × 10 m. . . . .	240
B.65. Schrittspannungen bei Verwendung von Sternerdern im 90°-Winkel unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude 10 m × 50 m. . . . .	241
B.66. Schrittspannungen um ein Gebäude 2 m × 2 m bei einem Fundament-erder mit und ohne zusätzliche Leiterbögen an den Ecken. . . . .	242
B.67. Schrittspannungen um ein Gebäude 2 m × 5 m bei einem Fundament-erder mit und ohne zusätzliche Leiterbögen an den Ecken. . . . .	243
B.68. Schrittspannungen um ein Gebäude 10 m × 50 m bei einem Funda-menterder mit und ohne zusätzliche Leiterbögen an den Ecken. . . .	244
B.69. Schrittspannungen bei Einsatz von Bodenverbesserern, $I = 100 \text{ kA}$ .	245
B.70. Schrittspannungen bei Einsatz von Bodenverbesserern, $I = 150 \text{ kA}$ .	245
B.71. Schrittspannungen in und um eine(r) Schutzhütte bei Verwendung der Erdungsvariante „Ring“ . . . . .	247
B.72. Schrittspannungen in und um eine(r) Schutzhütte bei Verwendung der Erdungsvariante „Kreuz“ . . . . .	248
B.73. Schrittspannungen in und um eine(r) Schutzhütte bei Verwendung der Erdungsvariante „Gitter“ . . . . .	249
B.74. Schrittspannungen in und um eine(r) Schutzhütte bei Verwendung der Erdungsvariante „feines Gitter“ . . . . .	250
B.75. Schrittspannungen in und um eine(r) Schutzhütte bei Verwendung der Erdungsvariante „feines Gitter + TE“ . . . . .	251
B.76. Schrittspannungen in und um eine(r) Schutzhütte ( $I = 100 \text{ kA}$ ) . . .	252



# Tabellenverzeichnis

3.1. Blitzstromparameter der Gefährdungspegel gemäß DIN EN 62305-1 . . .	16
5.1. Herzstromfaktoren . . . . .	38
5.2. Gesamt-Körperimpedanzen für den Strompfad Hand–Hand, 50-Hz- Wechselspannung und große, trockene Kontaktflächen . . . . .	40
5.3. Gesamt-Körperimpedanzen für den Strompfad Hand–Hand, 50-Hz- Wechselspannung und große, mit Salzwasser bef. Kontaktflächen . . .	40
5.4. Werte für $K$ in DALZIELS „ <i>electrocution equation</i> “ . . . . .	47
5.5. Zusammenfassung der unterschiedlichen Schrittspannungsgrenzwerte	54
6.1. Verhältnis zwischen leerlaufender und tatsächlicher Schrittspannung	66
7.1. Maximale Potentiale und resultierende Erdungswiderstände bei unter- schiedlichen Tiefenerdern . . . . .	115
7.2. Verlegetiefen der Ringerder bei einer Vier-Ringerder-Anlage und freier Variation der vertikalen Ringabstände . . . . .	127
7.3. Nadirwinkel $\alpha$ und Azimut $\beta$ der verschiedenen Ausführungen nach innen gerichteter Schrägerder . . . . .	131
8.1. Wirksamkeitsmatrix unterschiedlicher Erderkonfigurationen für recht- eckige Gebäude und linearen Boden . . . . .	152
8.2. Wirksamkeitsmatrix unterschiedlicher Erderkonfigurationen für recht- eckige Gebäude und nichtlinearen Boden . . . . .	153



# Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird über die Untersuchung von Blitzschutz-Erdungsanlagen unter der besonderen Berücksichtigung von Schrittspannungen berichtet. Anlass für diese Untersuchung ist die Diskrepanz, dass die aktuelle VDE-Normung zur Reduzierung von Schrittspannungen Erdungsanlagen vorsieht, die einerseits sehr aufwändig und damit teuer sind, andererseits auf Grund ihrer Größe in dicht bebauten Gebieten nicht realisierbar sind. Ziel ist es daher, zu untersuchen, ob Erdungsanlagen nach der aktuellen VDE-Norm wirksam im Sinne des Auftretens lediglich ungefährlicher Schrittspannungen sind; falls nicht, wie sie wirksam gestaltet werden können; und falls ja, ob sie auch in einfacheren Ausführungen immer noch wirksam sind.

Um beurteilen zu können, ob eine Erdungsanlage wirksam ist oder nicht, ist es notwendig zu wissen, bis zu welcher Höhe Schrittspannungen für den Menschen als ungefährlich angesehen werden können. Da solche Angaben für den speziellen Fall kurzer Impulse und den Strompfad Fuß-Fuß nicht allgemein bekannt sind, wird zunächst die Wirkung von Strom auf den menschlichen Körper dargestellt und mit Hilfe von Literaturstellen mögliche Werte für einen Schrittspannungs-Grenzwert hergeleitet. Als weitere, neue Methode wird zusätzlich die Computersimulation von elektrischen Strömen durch den menschlichen Körper herangezogen.

Die Untersuchung der einzelnen Blitzschutz-Erdungsanlagen erfolgt ebenfalls mit Hilfe von Computersimulationen, wobei aus Effizienzgründen stationäre Strömungsfeld-Simulationen zum Einsatz kommen. Als Besonderheit werden Erdungsanlagen dabei nicht nur in homogenem Boden konstanter Leitfähigkeit simuliert, sondern auch mit Berücksichtigung nichtlinearen Bodenverhaltens, welches sich aus dem Effekt der Bodenionisierung ergibt. Des Weiteren werden die Untersuchungen systematisch an Hand von vier vordefinierten Gebäudegrößen vorgenommen. Dabei wird eine Vielzahl unterschiedlicher Erderkonfigurationen wie Ring- und Stab-Erder jeweils in jeder Kombination aus diesen vier Gebäudegrößen, dem unterschiedlichen Bodenverhalten sowie drei unterschiedlichen Blitzstromstärken untersucht. Konkret werden dabei auch die in der VDE-Normung vorgesehenen („konventionellen“) Erderkonfigurationen mit Konfigurationen, die auf eigenen Überlegungen („nichtkonventionelle Erdungskonzepte“) basieren, verglichen.

Nach der reinen Vorstellung der Ergebnisse werden diese diskutiert, miteinander verglichen und eine Wirksamkeitsmatrix aufgestellt. Auf der Basis dieser Diskussion werden allgemeine Regeln zur Auslegung von Blitzschutz-Erdungsanlagen abgeleitet. Dabei zeichnet sich als ein wesentlicher Aspekt ab, dass die Schutzwirkung der Erdungsanlage gegen gefährliche Schrittspannungen u. a. von der Größe des zu schützenden Gebäudes abhängt: sehr kleine Gebäude lassen sich kaum oder nur mit sehr hohem Aufwand schützen, während größere Gebäude schon mit deutlich geringerem Aufwand, als in der VDE-Norm vorgesehen, geschützt werden können.





# 1. Einleitung

Zweifelsohne stellen Blitzeinschläge eine große Gefahr für Menschenleben und Sachwerte dar. Daher beschäftigten sich bereits seit Mitte des 18. Jahrhunderts Menschen mit der Frage, wie Gebäude vor Blitzen geschützt werden können. Als Pioniere auf diesem Gebiet gelten heute der Amerikaner Benjamin Franklin und der Tscheche Prokop Diviš, welche Blitze überhaupt erst als elektrisches Phänomen erkannten und auf dieser Erkenntnis basierend erste Blitzableiter konstruierten.

Seither wurden Blitzableiter und allgemein Blitzschutzanlagen kontinuierlich weiterentwickelt. Ein wesentlicher Bestandteil einer modernen äußeren Blitzschutzanlage eines Gebäudes ist, neben den sogenannten Fangeinrichtungen – in der Regel auf dem Dach angebracht – und den Ableitungen in Richtung Erdboden, eine Erdungseinrichtung. Dieser kommt die Aufgabe zu, den Blitzstrom sicher in den Erdboden einzuleiten, möglichst ohne dabei Personen oder Sachwerte zu gefährden. Die praktische Umsetzung dieser Forderung ist jedoch schwierig, da bei einer solchen Erdung sehr hohe Blitzströme einerseits und eine üblicherweise schlechte Leitfähigkeit des Erdbodens andererseits aufeinander treffen, was zwangsläufig dazu führt, dass sich in und um die Erdungsanlage hohe Potentiale und Potentialdifferenzen einstellen.

Die letztgenannten Potentialdifferenzen machen sich auf der Erdoberfläche als sogenannte Schrittspannungen bemerkbar, die ein Mensch, der beispielsweise zum Zeitpunkt des Blitzschlages im Bereich der Erdungsanlage läuft, erfahren und dadurch gesundheitliche Schäden davontragen könnte. Wie in Kapitel 3.2 näher ausgeführt wird, trägt die aktuelle VDE-Normung diesem Zusammenhang nur eingeschränkt Rechnung, andererseits werden dort sehr aufwändige Ausführungen von Erdungsanlagen empfohlen.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, Blitzschutz-Erdungsanlagen unter dem Aspekt der entstehenden Schrittspannungen zu untersuchen und dabei zum einen festzustellen, wie stark die Gefährdung durch Schrittspannungen tatsächlich ist, und zum anderen, ob und gegebenenfalls wie Blitzschutz-Erdungsanlagen optimiert werden könnten. Dazu ist es auch notwendig, sich mit medizinischen Aspekten auseinanderzusetzen, um beurteilen zu können, welche Schrittspannungen für einen Menschen überhaupt gefährlich sind.

Die Untersuchung der Blitzschutz-Erdungsanlagen erfolgt dabei mit Hilfe von Computersimulationen. Wie in Kapitel 6.2.1 näher begründet wird, kommen nach einer Abwägung der jeweiligen Vor- und Nachteile Simulationen stationärer Strömungsfelder statt transienter Simulationen zum Einsatz.

In diesem Zusammenhang muss auch eine ausdrückliche Warnung ausgesprochen werden. Im Rahmen dieser Untersuchung treffen mindestens zwei Faktoren zusammen, die beide für sich genommen hochgradig statistischer Natur sind: Dies ist ei-

## *1. Einleitung*

nerseits der Blitz als solches, von dem sich auch heute noch nicht sicher vorhersagen lässt, wo genau er einschlägt und wie groß der dabei frei werdende Blitzstrom ist (siehe hierzu auch Kapitel 2). Andererseits ist das der Mensch, dessen Reaktion auf eine elektrische Durchströmung von einer ganzen Reihe von Faktoren wie Alter, Gewicht und medizinischer Prädisposition abhängt und sich daher auch nur eingeschränkt vorhersagen lässt. Als dritte Unbekannte – wenn auch weniger statistisch bestimmt – sind die Eigenschaften des lokal vorhandenen Erdbodens. Alle in dieser Arbeit getroffenen Annahmen und abgeleiteten Aussagen bemühen sich zwar, diesen Zusammenhängen soweit wie möglich dadurch Rechnung zu tragen, dass stets von möglichst ungünstigen Fällen ausgegangen wird („Worst-Case-Betrachtung“), es muss jedoch auch klargestellt werden, dass es vor dem geschilderten Hintergrund keine 100%ige Sicherheit gibt und niemals geben kann.

## 2. Blitze – Entstehung, Häufigkeit, Parameter

**Zusammenfassung:** *In diesem Kapitel wird kurz umrissen, wie Gewitter und Blitze entstehen, wie häufig sie auftreten und durch welche Parameter sich ein Blitzereignis charakterisieren lässt.*

### 2.1. Entstehung und Häufigkeit

In einer Gewitterwolke herrschen, bedingt durch die großen Temperaturunterschiede zwischen unterem und oberem Ende, üblicherweise starke Aufwinde. Diese Aufwinde transportieren Wassertröpfchen und Eiskristalle nach oben, welche an anderen Stellen in der Gewitterwolke durch die Schwerkraft wieder nach unten sinken. Durch diesen Materialtransport kommt es zu einer Ladungstrennung innerhalb der Gewitterwolke: normalerweise mit je einer positiven Raumladungszone am unteren und oberen Ende sowie einer negativen Raumladungszone in der Mitte der Wolke. Abbildung 2.1 zeigt eine schematische Darstellung.

Die Mechanismen, die zu dieser Ladungstrennung führen, sind bislang noch nicht endgültig verstanden, Erklärungsmodelle hierzu können in weiterführender Literatur, beispielsweise von COORAY und RAKOV ([Coo10], [RU03], [HS09]), nachgelesen werden. Dies gilt auch für ausführlichere Informationen zum restlichen Inhalt dieses Kapitels, insbesondere auch zu den Entladungsprozessen.

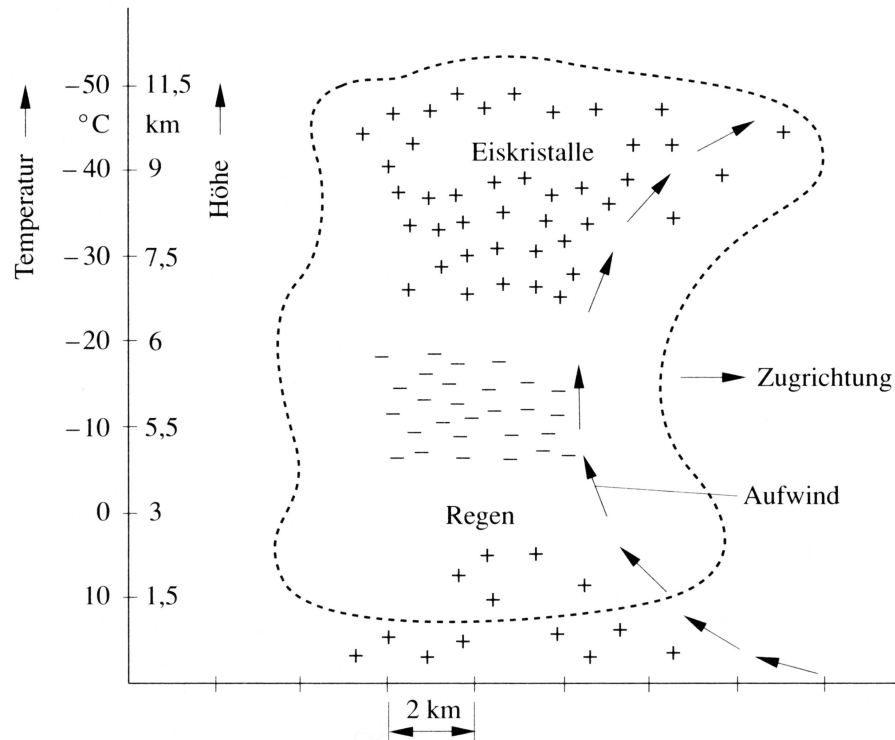
Ein Durchschlag von einer dieser Raumladungszonen in der Wolke zu einer anderen Raumladungszone oder zum Boden wird als Blitz bezeichnet. Blitze werden dabei in verschiedene Gruppen eingeteilt:

**Wolke-Wolke-Blitze** Hierbei kommt es zu einem Überschlag innerhalb einer Wolke, von einer Wolke zu einer anderen oder zu einer Entladung von einer Wolke in die umgebende Luft. Diese Blitze sind für das hier behandelte Blitzschutzthema nicht von Interesse, da die Entladung nicht den Erdboden erreicht.

**Wolke-Erde-Blitze** oder Abwärtsblitze: Hierbei wächst die Blitzentladung als sogenannter „*stepped leader*“ in Ruckstufen aus der Wolke in Richtung des Erdbodens vor und verzweigt sich in der Regel nach unten (siehe Abbildung 2.2a und 2.2b).

**Erde-Wolke-Blitze** oder Aufwärtsblitze: Auch hier wächst die Blitzentladung in

## 2. Blitze – Entstehung, Häufigkeit, Parameter



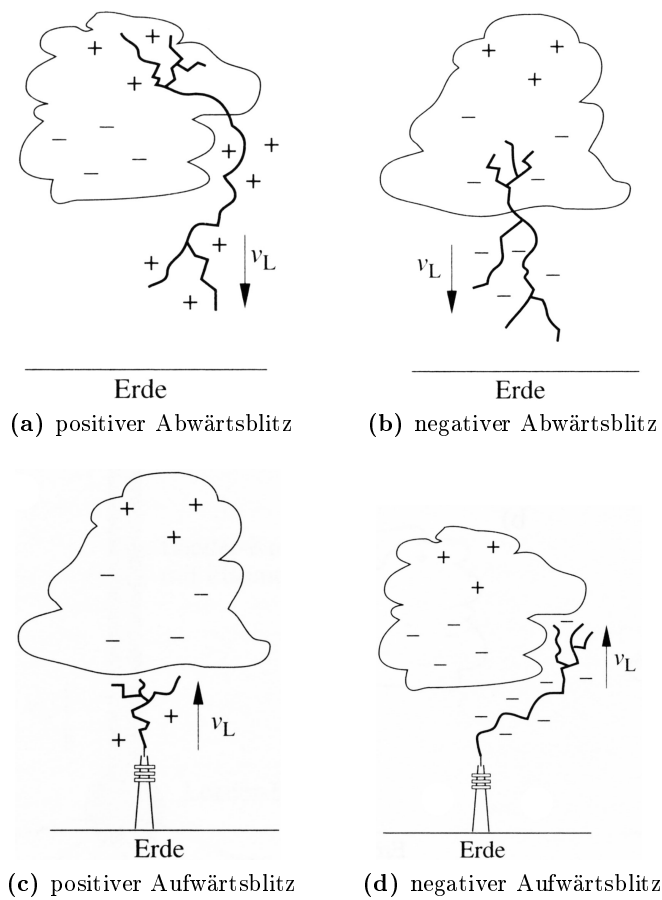
**Abbildung 2.1.:** Schematischer Aufbau einer Gewitterwolke (aus [HS09])

Ruckstufen vor, allerdings vom Erdboden aus in Richtung der Wolke, und verzweigt sich dabei nach oben. Aufwärtsblitze können nur von hohen, eher spitzen Strukturen ausgehen wie beispielsweise Fernsehtürme, Sendemasten und hohe Industrieschornsteine (siehe Abbildung 2.2c und 2.2d).

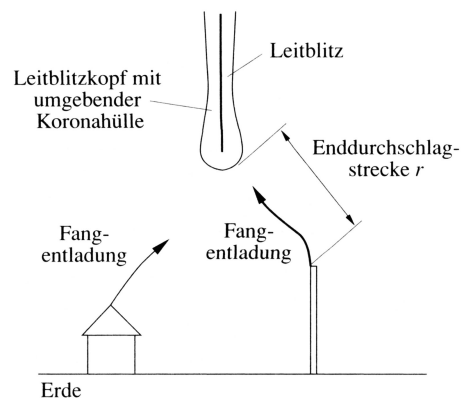
Zusätzlich wird sowohl bei Abwärts- als auch Aufwärtsblitzen noch jeweils nach der Polarität der dabei transportierten Ladung unterschieden, man spricht – entsprechend der Ladung – von positiven oder negativen Abwärts- bzw. Aufwärtsblitzen.

Wie bereits geschrieben, verzweigen sich Blitze in der Regel während des Vorwachsens des sogenannten Leitblitzes. Bei Abwärtsblitzen ist dabei zu beachten, dass dem Leitblitz aus der Wolke vom Boden aus in der Regel mehrere sogenannte Fangentladungen von unterschiedlichen Punkten aus entgegenwachsen (siehe Abbildung 2.3). Erst wenn durch die gegenseitige Annäherung von Leitblitz und Fangentladung die sogenannte Enddurchschlagsstrecke – die in Abhängigkeit von der Stärke der Blitzentladung zwischen ca. 10 m und ca. 100 m betragen kann – unterschritten ist, kommt es zum endgültigen Durchschlag. Beim Prozess der gegenseitigen Annäherung von Leitblitz und Fangentladung sowie der „Auswahl“ der Fangentladung, die zum Durchschlag führt, spielen auch statistische Vorgänge eine Rolle, sodass sich a priori in der Regel nicht bestimmen lässt, wo genau ein Blitz einschlägt.

Um nicht zuletzt für Blitzschutz Zwecke dennoch eine Statistik über die Häufigkeit



**Abbildung 2.2.:** Unterschiedliche Typen von Wolke-Erde- und Erde-Wolke-Blitzen (aus [HS09])



**Abbildung 2.3.:** Vorentladung aus der Wolke und Fangentladungen vom Boden aus bei einem Abwärtsblitz (aus [HS09])

## 2. Blitze – Entstehung, Häufigkeit, Parameter

von Gewittern beziehungsweise Blitzeinschlägen zu haben, werden seit etlichen Jahren Sensornetzwerke betrieben, die das Auftreten von Blitzen registrieren. Mit Hilfe dieser Daten können dann Karten erstellt werden, welche die lokale Gewitterhäufigkeit wiedergeben. Dies geschieht aus praktischen Gründen in der Regel als Dichte der Wolke-Erde- und Erde-Wolke-Blitze („*ground flash density*“) in der Form Anzahl je Quadratkilometer und Jahr. Beispiele für solche Sensornetzwerke sind das *BLIDS*-System der Firma Siemens in Deutschland [BLI13], *ALDIS* in Österreich [ALD13] oder das von den USA aus betriebene weltweite *WWLLN*-Netzwerk [Hol13]. Abbildung 2.4 zeigt eine solche Karte für Deutschland.

### 2.2. Blitzparameter

Neben der im vorherigen Abschnitt angesprochenen flächenmäßigen Detektierung von Blitzeinschlägen gab und gibt es auch Blitzmessstationen (in der Regel an hohen Türmen), welche die Blitze, die an dieser Stelle einschlagen, messtechnisch erfassen – insbesondere im Hinblick auf die Stromstärke und den zeitlichen Verlauf des Stromes. Eine der bekanntesten dieser Messungen waren die Messreihen von BERGER auf dem Monte San Salvatore in den 1940er bis 1970er Jahren. Aktuell sind solche Blitzmessstationen beispielsweise auf dem Hohen Peißenberg ([MHS09], [MHS11]) und auf der Offshore-Forschungsplattform *FINO 3* in der Nordsee ([SBS09], [SB11]) in Betrieb.

Aus den Ergebnissen dieser Messstationen ist bekannt, dass sich ein einzelnes Blitzereignis („Blitzschlag“) meist aus mehreren Teilereignissen zusammensetzt:

- Ein stromstarker Erstblitz (Erst-Stoßstrom),
- mehrere Folgeblitze (Folge-Stoßströme) und
- ein für mehrere Zehntelsekunden fließender Gleichstrom (Langzeitstrom).

Die Anzahl der Folgeblitze und das Auftreten beziehungsweise die Länge des Langzeitstromes variieren dabei von Blitzereignis zu Blitzereignis und auch mit der Art des Blitzes (positiver oder negativer Abwärts- oder Aufwärtsblitz). Ein Beispiel für ein solches Blitzereignis mit zahlreichen Einzelkomponenten ist in Abbildung 2.5 zu sehen. Negative Abwärtsblitze machen ca. 90 % aller Blitze aus und haben dabei im Mittel zwei bis drei Folgeblitze [HS09].

Die aus den Blitzmessstationen gewonnenen Werte, insbesondere der von BERGER gemessenen Werte, wurden zunächst durch die Cigré veröffentlicht [BAK75] und in der Folge in ihrer Gesamtheit immer wieder mit statistischen Methoden ausgewertet – unter anderem im Auftrag der Cigré selbst [AE80], aber auch durch Dritte, beispielsweise durch HEIDLER. Daraus ergeben sich vier Parameter, mit deren Hilfe sich die wesentlichen elektrischen Eigenschaften eines Blitzereignisses charakterisieren lassen:

**Stromscheitelwert  $I$**  Der Stromscheitelwert liegt typischerweise zwischen etwa 10 kA und 100 kA. (Es wurden jedoch auch schon extreme Scheitelwerte bis 250 kA beobachtet.) Der Stromscheitelwert bestimmt die Höhe des Spannungsfalls an

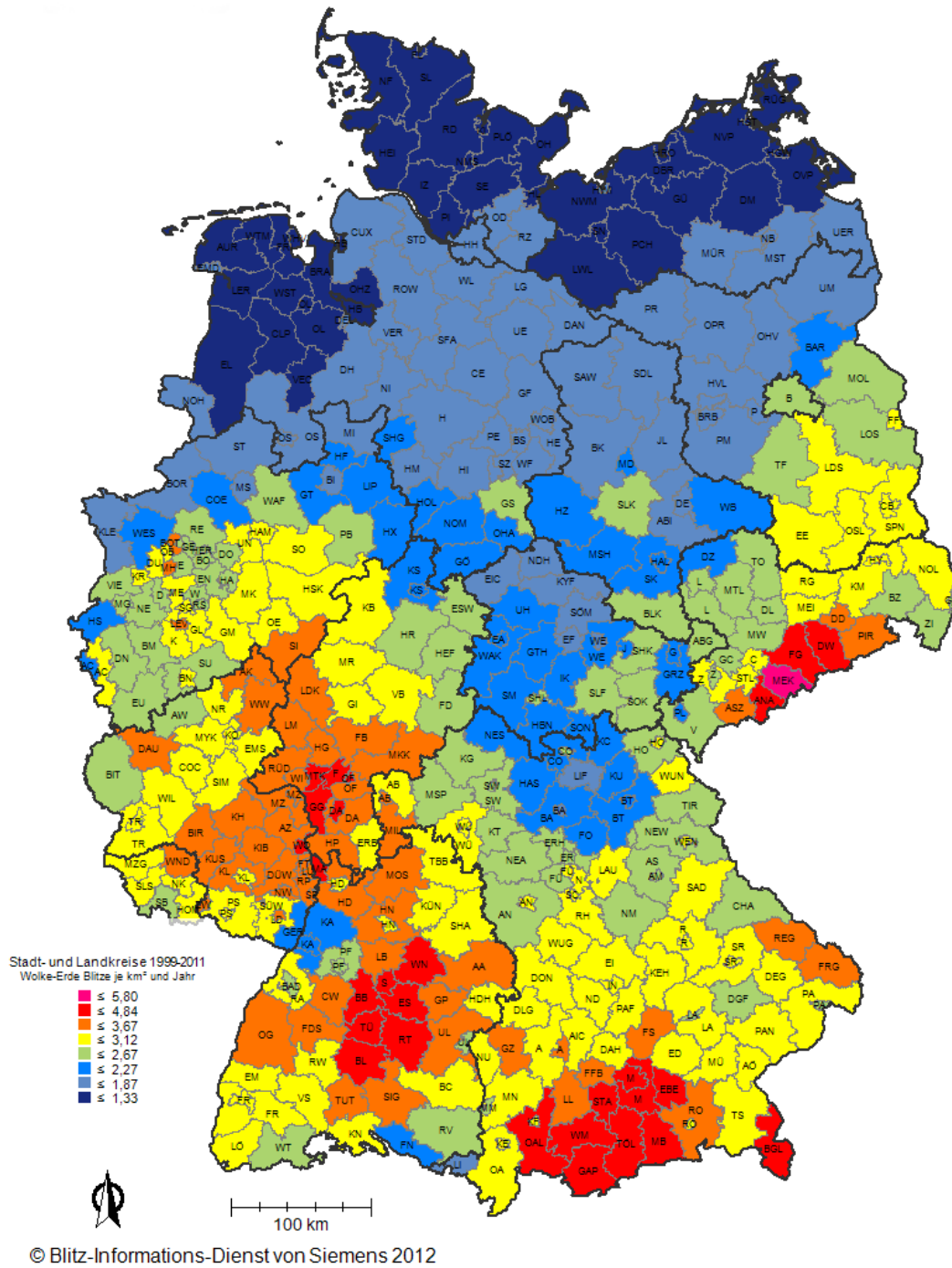
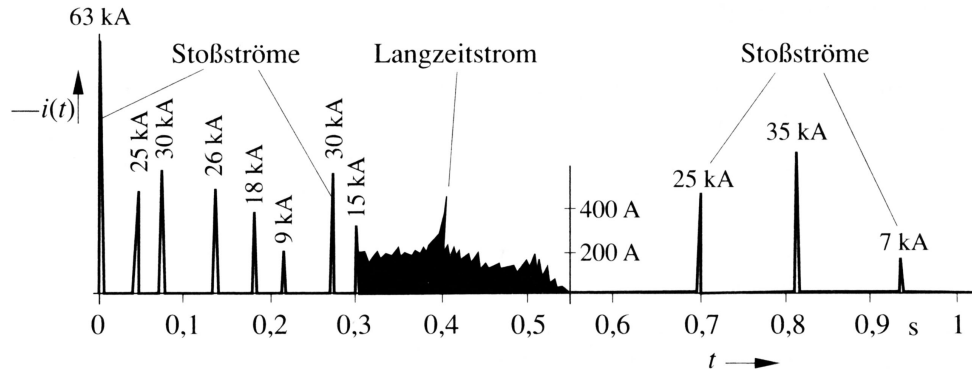


Abbildung 2.4.: Blitzdichte in Deutschland (Quelle: [BLI13])

## 2. Blitze – Entstehung, Häufigkeit, Parameter



**Abbildung 2.5.:** Negativer Wolke-Erde-Blitz mit mehreren Teilströmen nach BERGER (aus [HS09])

resistiven Komponenten im Pfad des Blitzstromes und ist daher maßgeblich unter anderem für die Potentialanhebung an einer Erderanlage im Fall eines Blitzschlages („*earth potential rise*“, EPR) und damit auch für das Auftreten von Schrittspannungen. Im Normalfall ist  $I$  beim Erstblitz deutlich größer als bei Folgeblitzen. Eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für Stromscheitelwerte ist in Abbildung 2.6 zu sehen.

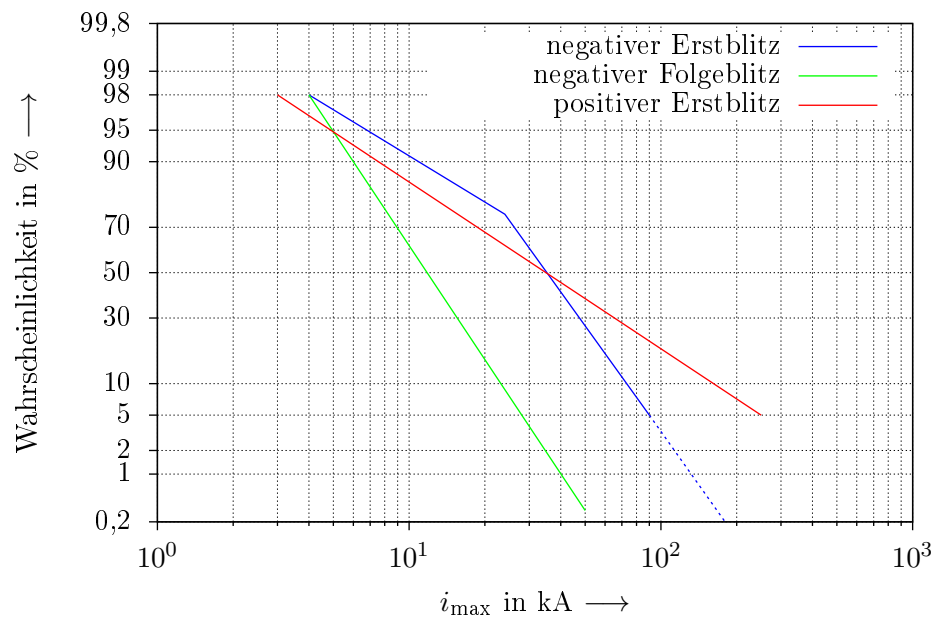
**Maximale Stromsteilheit**  $(di/dt)_{\max}$  Die maximale Stromsteilheit bestimmt die Intensität von induktiven Effekten, beispielsweise die Höhe der Ströme und Spannungen, die in Leitungen induziert werden, die der Blitzschutzanlage benachbart sind. Ebenso wird der induktive Spannungsfall etwa auf Ableitungen durch die Stromsteilheit bestimmt. Typische Werte liegen zwischen  $1 \text{ kA}/\mu\text{s}$  und  $200 \text{ kA}/\mu\text{s}$ . Folgeblitze weisen in der Regel deutlich größere Stromsteilheiten als der Erstblitz auf.

**Ladung**  $Q = \int i \, dt$  Die Ladung bestimmt unter anderem das Ausmaß von Aufschmelzungen am Einschlagspunkt des Blitzes. Typische Werte liegen zwischen  $1 \text{ As}$  und  $100 \text{ As}$  für einzelne Teilblitze, positive Blitze können in Summe über ihre Teilblitze bis  $300 \text{ As}$  erreichen.

**Spezifische Energie**  $W/R = \int i^2 \, dt$ , auch „Stromquadrat-Integral“ oder „*action integral*“ genannt. Die spezifische Energie bestimmt die resistive Erwärmung von Leitern, durch die Blitzstrom fließt, sowie den elektromechanischen Kraftimpuls auf Leiter. Typische Werte liegen zwischen  $1 \text{ kJ}/\Omega$  und  $10 \text{ MJ}/\Omega$ .

Auf Grund dieser statistischen Auswertungen wurden für die Blitzschutznormung Werte ermittelt, für die eine Blitzschutzanlage ausgelegt sein muss. Siehe hierzu das folgende Kapitel 3.2.1.





**Abbildung 2.6.:** Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Stromscheitelwert  $I$  von Blitzen nach HEIDLER (aus [HS09])



## 3. Stand des Wissens und der Normung

**Zusammenfassung:** *In diesem Kapitel wird der aktuelle Stand des Wissens im Allgemeinen und der Normung im Besonderen zusammengefasst. Dazu werden in Bezug auf den Stand des Wissens Aspekte der Erdungsberechnung, experimenteller Untersuchungen und der Bodenionisation angesprochen. In Bezug auf die Normung werden zunächst die besonderen Aspekte der Schrittspannung in der deutschen Blitzschutznormung besprochen. Da in der VDE-Normung zu elektrischen Anlagen mit Nennspannungen über 1 kV intensiver auf Schrittspannungen eingegangen wird, wird auch diese kurz vorgestellt. Abschließend wird noch auf IEC-Dokumente zu Auswirkungen des elektrischen Stromes auf den menschlichen Körper verwiesen.*

Nachdem das vorherige Kapitel 2 dargelegt hat, welche Bedrohungen Blitze prinzipiell darstellen, soll in den folgenden Unterkapiteln nun zusammengefasst werden, welche Erkenntnisse unter technischen Aspekten bislang zum Thema Erdungsanlagen und speziell Schrittspannungen durch frühere Untersuchungen gewonnen wurden. Medizinischen Aspekten der Wirkung elektrischen Stromes auf den Menschen ist ein eigenes Kapitel (Kapitel 5) gewidmet.

### 3.1. Aktueller Stand des Wissens

#### 3.1.1. Grundlagen zur Schrittspannung

Fließt ein Blitzstrom in den Erdboden – egal, ob bedingt durch einen „natürlichen“ Blitzeinschlag oder durch einen Blitzschlag in einen Blitzableiter und dadurch weitergeleitet in ein Blitzschutz-Erdungssystem – bewirkt dieser ein elektrisches Feld im Boden gemäß

$$\vec{E} = \varrho \cdot \vec{J}. \quad (3.1)$$

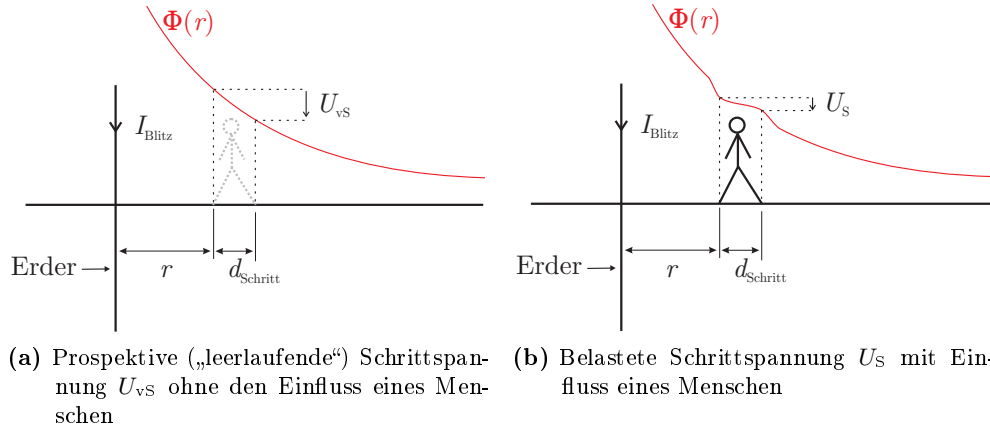
Durch Integration über eine gegebene Strecke ergibt sich aus dieser elektrischen Feldstärke eine elektrische Spannung.

Da der Erdboden einerseits ein eher schlechter Leiter ist (vgl. Abbildung 6.2), andererseits Blitzströme hohe Amplituden erreichen können (vgl. Kapitel 2.2 und

### 3. Stand des Wissens und der Normung

Tabelle 3.1), führt dies nach (3.1) zwangsläufig zu hohen elektrischen Feldstärken im Boden. Damit einher geht eine starke Anhebung des elektrischen Potentials  $\Phi$  gegenüber einer unendlich weit entfernten, idealen Erde unmittelbar am Einschlagspunkt des Blitzes beziehungsweise am Anschlusspunkt der Blitzschutz-Erdungsanlage. Diese Potentialanhebung wird im Englischen auch als „*Earth Potential Rise*“, kurz „*EPR*“ bezeichnet.

Dieses Potential  $\Phi$  baut sich mit zunehmender Entfernung vom Einschlagspunkt ab, wie Abbildung 3.1 verdeutlicht.



**Abbildung 3.1.:** Entstehung von Schrittspannungen

Wie aus Abbildung 3.1 ebenfalls ersichtlich ist, erfährt ein Mensch, der zum Zeitpunkt des Blitzeinschlages nahe der Einschlagstelle über den Boden läuft, eine sogenannte Schrittspannung  $U_{vS}$ , die sich aus der Potentialdifferenz des Bodens zwischen seinen beiden Füßen bestimmt. Da das örtliche elektrische Potential eine Funktion der Entfernung  $r$  vom Einschlagsort des Blitzes beziehungsweise von der Erdungsanlage ist ( $\Phi(r)$ )<sup>1</sup>, lässt sich die Schrittspannung in Abhängigkeit der Entfernung  $d_{\text{Schritt}}$  der beiden Füße voneinander gemäß

$$U_{vS} = \Phi(r) - \Phi(r + d_{\text{Schritt}}) \quad (3.2)$$

berechnen.

Dabei ist zwischen der sogenannten „prospektiven Schrittspannung“  $U_{vS}$  (die Potentialdifferenz auf dem Erdboden ohne Berücksichtigung eines Menschen) und der tatsächlichen Schrittspannung  $U_S$  (die tatsächlich an einem dort stehenden Menschen anliegt) zu unterscheiden. Auf die Zusammenhänge zwischen beiden Werten wird in den Kapiteln 6.1.4 und 3.2.2 noch näher eingegangen.

<sup>1</sup>Die Funktion  $\Phi(r)$  ist dabei stark von der verwendeten Erderanlage abhängig und lässt sich nur für sehr einfache Geometrien analytisch exakt bestimmen.

### 3.1.2. Erdungsberechnung

In der elektrischen Energietechnik war und ist das fachliche Interesse an Schritt- und Berührungsspannungen größer als in der Blitzschutztechnik. Der Grund hierfür sind Erdfehlerströme in elektrischen Mittel- und Hochspannungsanlagen, welche je nach Konfiguration des Netzes und der Schutzeinrichtungen mehrere Sekunden lang fließen können (im Gegensatz zu nur wenige Millisekunden dauernden Blitzströmen) und die dadurch auftretenden Schritt- und Berührungsspannungen in der Anlage arbeitendes Personal gefährden können. Entsprechend finden diese Themen auch ausführlichere Berücksichtigung in den relevanten Normen (vgl. Kapitel 3.2.2).

Auf Grund dieses Zusammenhanges stammen frühe Betrachtungen – zum damaligen Zeitpunkt noch rein analytischer Natur – zu Erdungssystem und Schrittspannungen hauptsächlich aus der Energietechnik. Besonders bekannt sind hier die Arbeiten von KOCH [Koc61], [Koc51], in denen unter anderem eine Erderanlage mit drei kreisförmigen, konzentrischen Ringerdern in zunehmender Verlegetiefe berechnet wird. Auch wenn sich heute nicht mehr zweifelsfrei nachvollziehen lässt, wie die Vorgaben zur Schrittspannungssteuerung ihren Weg in die aktuelle Blitzschutznormung (vgl. Kapitel 3.2.1) gefunden haben, liegt der Vermutung nahe, dass diese auf KOCH zurückgehen: NEUHAUS bezieht sich in einem Konferenzbeitrag speziell zu Blitzschutzerdungssystemen darauf und erweitert dies noch um einen vierten Ringerder [Neu71]. Der Nachteil der von KOCH ermittelten Lösungen ist jedoch, dass sie trotz einiger Vereinfachungen (und damit Inkaufnahme von Ungenauigkeiten) sehr komplex in der Anwendung sind und dennoch nur relativ spezielle Sonderfälle, nämlich kreisförmige Ringerder<sup>2</sup>, abdecken.

Wissenschaftliche Untersuchungen jüngerer Datums, die sich mit Blitzschutz-Erdungsanlagen beschäftigen, konzentrieren sich ausschließlich auf den Stoßerdungswiderstand und die damit verbundene absolute Potentialanhebung, nicht jedoch auf Schrittspannungen. Die jeweiligen Autoren wählten dabei unterschiedliche Ansätze: FDTD-Simulationen<sup>3</sup> ([YF10], [PSAV10], [TSS04]), analytische Ansätze ([Grc08], [SAO08], [ASAO08]), sowie Kombinationen aus mehreren dieser Methoden ([CGP10], [YYU11], [SP08])<sup>4</sup>. Unter den Beispielen für einen analytischen Ansatz zur Erdungsberechnung befindet sich auch die Arbeit von BARBOSA et al. [BPB11], in der zwar elektrische Feldstärken auf der Erdoberfläche berechnet werden, jedoch geschieht dies nur für reinen Erdboden ohne Erdungsleiter darin und auch nicht unter den Aspekten von Schrittspannungen oder Schrittspannungssteuerungen.

---

<sup>2</sup>KOCH behandelt noch weitere Erderformen wie senkrechte und waagrechte Staberder, Halbkugelerder und Plattenerder, wobei jedoch nur senkrechte Staberder praktische Relevanz für aktuelle Blitzschutz-Erdungsanlagen haben.

<sup>3</sup>FDTD: „*Finite Difference Time Domain*“, Simulationsmethode der Finiten Differenzen im Zeitbereich

<sup>4</sup>Die genannten Arbeiten sind keineswegs als abschließende Aufzählung zu verstehen, sondern lediglich als Beispiele.

#### 3.1.3. Experimentelle Untersuchungen

Da experimentelle Untersuchungen an realen Erdungsanlagen – im Sinne der Blitzschutzerdungsanlage beispielsweise eines ganzen Gebäudes – mit Prüf-Stoßströmen nach Norm (vgl. Kapitel 3.2.1) in voller Höhe eines enormen Aufwandes bedürften, um die dafür notwendigen Energien in einem Impulsgenerator zur Verfügung zu stellen, wurden derartige Experimente nach Kenntnisstand des Autors bislang nicht durchgeführt. WIATER führte experimentelle Untersuchungen mit Schrittspannungsmessungen durch, beschränkte sich dabei jedoch auf eine Baumwurzel und einen relativ kleinen Stoßstromgenerator, der die einfacher zu erzeugende (vgl. hierzu ROCK [Roc12]) Impulsstromform  $8/20\text{ }\mu\text{s}$  mit maximal  $37\text{ kA}$  lieferte [Wia11]. NIXON untersuchte das Verhalten eines einzelnen Staberders mit Stoßströmen ähnlich der Form  $4/10\text{ }\mu\text{s}$  und Amplituden bis ca.  $30\text{ kA}$  [Nix06].

Weitere veröffentlichte experimentelle Untersuchungen mit Stoßströmen und Stoßspannungen ignorieren den Aspekt der Schrittspannung und verwenden ebenfalls nur  $8/20\text{-}\mu\text{s}$ -Impulse geringer Amplitude [WZHY12] oder beschränken sich auf Laboruntersuchungen von Bodenproben in kleinen Prüfgefäßen [Mou94], [LFMD83], [DACM10].

Sofern die Experimente an realen Erdungsanlagen durchgeführt werden, beschränken sich die Autoren ansonsten auf Messungen mit technischen Wechselspannungen [MM12], Messungen mit Niederfrequenz-Wechselspannungen [CKGA12] oder Messungen mit geringen Impulsströmen [WZHY12], [YYU11], [VAVA10]. Insbesondere zu experimentellen Untersuchungen mit geringen Impulsspannungen und -strömen existieren sehr viele Veröffentlichungen, deren Aufzählung den Rahmen dieser Arbeit sprengen würden. Sie alle bergen jedoch das prinzipbedingte Problem in sich, dass sich mit nur geringen eingebrachten Energien weder Ionisationvorgänge im Boden beobachten noch größere Erdungsstrukturen untersuchen lassen.

In den letzten Jahren sehr aktiv war auch die Forschungsgruppe um HADDAD der Universität Cardiff. Hier wurden zahlreiche Untersuchungen von Experimenten mit Bodenproben zur Bestimmung der Bodenionisation [NHG06], [Nor06] bis hin zu praktischen Versuchen an Erdungsanordnungen durchgeführt. Letztere wurden zwar mit Hochfrequenz und steilen Impulsen, jedoch größtenteils nur mit Niederspannung und Strömen im ein- bis zweistelligen Ampere-Bereich durchgeführt [MGHH12a], [MGHH12b], [HGH11], [MHGH10], [GLH<sup>+</sup>10], sodass auch hier die oben genannte Einschränkung der Übertragbarkeit auf Blitzströme gilt. Einige Experimente wurden auch mit Strömen im Kiloampere-Bereich durchgeführt [HGAH10], mit denen auch in größerem Maßstab Bodenionisation nachgewiesen werden konnte. Die hierbei untersuchten Anordnungen waren jedoch eher klein und die dabei entstehenden Schrittspannungen wurden ebenfalls nicht ausgewertet.

#### 3.1.4. Bodenionisation

Bereits seit längerer Zeit ist bekannt, dass Erdboden unter dem Einfluss elektrischer Felder seine Leitfähigkeit ändert – eine Veröffentlichung von BERGER diesbezüglich datiert beispielsweise auf das Jahr 1946 [Ber46], wobei dieser Effekt als „Bodenionisa-

tion“ bekannt ist. Seither wurden immer wieder Böden auf ihr Verhalten bei starker elektrischer Durchströmung hin untersucht (z. B. [Mou94], [AV12]), ein Beitrag von ASIMAKOPOULOU et al. enthält einen guten Überblick über diese und weitere Untersuchungen [AGS11]. LEADON konnte durch Fluten von Bodenproben mit SF<sub>6</sub> schließlich nachweisen, dass es sich bei der Bodenionisation um elektrische Durchschläge der mikroskopischen Lufträume zwischen den einzelnen Bodenpartikeln handelt [LFMD83].

## 3.2. Aktueller Stand der Normung

### 3.2.1. Blitzschutznormung

In Absprache mit dem Projektpartner war die zugrundeliegende Forschungsarbeit primär auf Deutschland fokussiert, weswegen sich dieses Kapitel auch auf die deutsche Normung konzentriert. Durch diese ist die Planung und die Errichtung von Blitzschutzanlagen grundsätzlich durch die Normenreihe DIN EN 62305 (VDE 0185-305) geregelt ([EN62305-1] ff.). Diese teilt ein Blitzschutzsystem („*Lightning Protection System*“, LPS) in zwei Teile ein (Definitionen nach DIN EN 62305-1<sup>5</sup>):

**Äußerer Blitzschutz** Teil des Blitzschutzsystems, bestehend aus einer Fangeinrichtung, einer Ableitungseinrichtung und einer Erdungsanlage

**Innerer Blitzschutz** Teil des Blitzschutzsystems, bestehend aus einem Blitzschutz-Potentialausgleich und/oder der elektrischen Isolation gegenüber dem äußeren Blitzschutz

Der äußere Blitzschutz wird seinerseits in die bereits genannten drei Elemente unterteilt, die gemäß Norm wie folgt definiert sind:

**Fangeinrichtung** Teil des äußeren Blitzschutzes aus metallenen Elementen, wie Stäbe, vermaschte Leiter oder gespannte Seile, der zum Auffangen der Blitze bestimmt ist

**Ableitungseinrichtung** Teil des äußeren Blitzschutzes, der dazu bestimmt ist, den Blitzstrom von der Fangeinrichtung zur Erdungsanlage abzuleiten

**Erdungsanlage** Teil des äußeren Blitzschutzes, der den Blitzstrom in die Erde ableitet und dort verteilt

---

<sup>5</sup>Bei allen in diesem Kapitel grau hinterlegten Textpassagen handelt es sich um wörtliche Zitate aus den jeweils angegebenen Normen.

### 3. Stand des Wissens und der Normung

Zur Dimensionierung der einzelnen Anlagenteile definiert die Norm vier Gefährdungspegel („Lightning Protection Level“, LPL) von I bis IV, denen Maximalwerte für die Blitzparameter zugeordnet werden. Tabelle 3.1 gibt diese Einteilung mit ihren jeweiligen Parametern wieder.

**Tabelle 3.1.:** Blitzstromparamter der Gefährdungspegel gemäß DIN EN 62305-1

Blitzparameter			Gefährdungspegel (LPL)			
Parameter	Symbol	Einheit	I	II	III	IV
Erster Stoßstrom (Erstblitz)						
Scheitelwert	$I$	kA	200	150	100	100
Ladung	$Q_{\text{short}}$	C	100	75	50	50
Spezifische Energie	$W/R$	MJ/ $\Omega$	10	5,6	2,5	2,5
Zeitparameter	$T_1/T_2$	$\mu\text{s}/\mu\text{s}$		10/350		
Folgestoßstrom (Folgeblitze)						
Scheitelwert	$I$	kA	50	37,5	25	25
Mittlere Steilheit	$di/dt$	kA/ $\mu\text{s}$	200	150	100	100
Zeitparameter	$T_1/T_2$	$\mu\text{s}/\mu\text{s}$		0,25/100		
Langzeitstrom						
Ladung	$Q_{\text{long}}$	C	200	150	100	100
Zeitparameter	$T_{\text{long}}$	s		0,5		
Gesamtblitz						
Ladung	$Q_{\text{flash}}$	C	300	225	150	150

Da sich die vorliegende Arbeit ausschließlich mit Erdungsanlagen beschäftigt, sollen auch nur die Aussagen der Normenreihe hierzu näher betrachtet werden. Zur Ausführung von Erderanlagen sieht DIN EN 62305-3 in Abschnitt 5.4.2 zwei verschiedene Typen vor:

**Anordnung Typ A** Hierbei handelt es sich um stabförmige Erder, die vertikal, schräg oder horizontal in den Boden eingebracht werden. In Abhängigkeit von Blitzschutzklasse und Bodenwiderstand definiert die Norm hierzu Mindestlängen zwischen 5 m und 80 m, wobei je Ableitung mindestens ein Erder dieser Mindestlänge vorhanden sein sollte und insgesamt mindestens zwei Erder je Anlage vorhanden sein müssen.

**Anordnung Typ B** Hierbei handelt es sich um einen Ringerder, der entweder um das Gebäude verlegt wird oder als Fundamenterder ausgeführt ist. Auch hierfür definiert die Norm eine Mindestgröße in Form eines „mittleren Radius“, der durch den Ring aufgespannt wird, und der mindestens der für Typ A geforderten Länge entsprechen muss. Eine Vermaschung, also Kombination mit anderen (Ring)erdern ist zulässig.



Die Norm schreibt weiterhin vor, dass Erder vom Typ B um Erder vom Typ A ergänzt werden müssen, wenn die geforderte Mindestlänge mit Typ-B-Erdern alleine nicht erreicht wird.

Erdungswiderstände für Blitzschutzterder werden nach DIN EN 62305-3 als stationäre Widerstände mit Niederfrequenz gemessen, wobei sich die Frequenz zur Vermeidung von Interferenzen von der 50-Hz-Netzfrequenz und deren Oberwellen unterscheiden muss. Für diese Messung wird ein Höchst-Erdungswiderstand nicht *gefordert* – es wird jedoch *empfohlen*, dass der Erdungswiderstand  $10\ \Omega$  nicht überschreitet. Umgekehrt darf die geforderte Mindesterdlerlänge aber unterschritten werden, sofern ein Erdungswiderstand von  $10\ \Omega$  nicht überschritten wird (DIN EN 62305-3, Abschnitt 5.4.2.1). Die Norm *empfiehlt* weiterhin, unter anderem nach Fertigstellung der Blitzschutzanlage, den Erdungswiderstand zu messen (DIN EN 62305-3, Abschnitte 7 und E.7).

Zum Thema Schutzmaßnahmen gegen Schrittspannungen führt DIN EN 62305-3 aus (Abschnitt 8.2):

Unter bestimmten Bedingungen kann die Nähe zu den Ableitungen lebensgefährlich sein, selbst wenn das LPS nach den vorstehenden Anforderungen ausgelegt und errichtet wurde.

Die Gefahr wird auf ein annehmbares Maß verringert, wenn eine der folgenden Bedingungen erfüllt wird:

- a. Unter bestimmungsgemäßen Betriebsbedingungen befinden sich keine Personen in einem Umkreis von 3 m von den Ableitungen.
- b. Ein System von mindestens 10 Ableitungen, die 5.3.5<sup>6</sup> entsprechen, ist vorhanden.<sup>7</sup>
- c. Der Übergangswiderstand der oberflächlichen Bodenschicht ist innerhalb von 3 m um die Ableitungen nicht kleiner als  $100\ \text{k}\Omega$ .

ANMERKUNG Eine Schicht Isolierstoff, z. B. Asphalt mit einer Dicke von 5 cm (oder eine Schicht Kies mit einer Dicke von 15 cm), reduziert im Allgemeinen die Gefahr auf ein annehmbares Maß.

Wenn keine dieser Bedingungen erfüllt ist, müssen folgende Schutzmaßnahmen zur Vermeidung von Verletzung von Personen infolge von Schrittspannungen ergriffen werden:

---

<sup>6</sup> Abschnitt 5.3.5 der Norm definiert sogenannte „natürliche Ableitungen“, also Teile der zu schützenden Einrichtung, die nicht speziell für das LPS geplant, aber dennoch dafür genutzt werden – beispielsweise Stahlträger eines Gebäudes

<sup>7</sup> Im nationalen Vorwort zur Norm werden Vorbehalte gegen diesen Punkt geäußert und es wird empfohlen, diese Maßnahme nicht anzuwenden.

### 3. Stand des Wissens und der Normung

- Potentialausgleich durch vermaschte Erdungsanlage;
- Absperrungen und/oder Warnhinweise zur Verringerung der Wahrscheinlichkeit des Betretens des gefährlichen Bereichs innerhalb von 3 m um die Ableitung.

Schutzmaßnahmen müssen den zutreffenden Normen entsprechen (siehe ISO 3864-1).

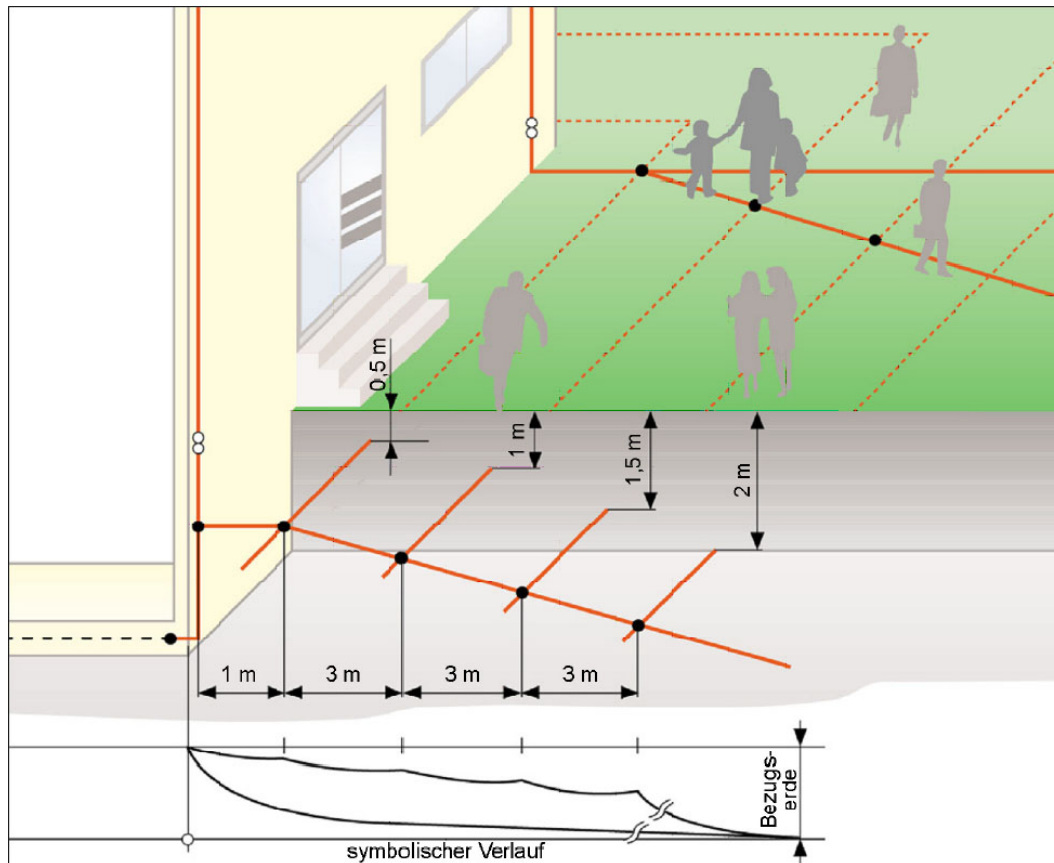
In Anhang E der Norm, welcher nur informativ, nicht aber normativ ist, wird dies näher erläutert und folgende Ausführung vorgeschlagen:

Wenn sich viele Personen häufig in einem Bereich in der Nähe der zu schützenden baulichen Anlage aufhalten, sollte eine weitere Potentialsteuerung für derartige Bereiche vorgesehen werden. Weitere Ringerder sollten in einem Abstand von etwa 3 m vom ersten und den weiteren Ringleitern entfernt installiert werden. Die von der baulichen Anlage weiter entfernten Ringerder sollten tiefer unter der Oberfläche installiert werden, d. h. die in einer Entfernung von 4 m von der baulichen Anlage in einer Tiefe von 1 m, die in einer Entfernung von 7 m von der baulichen Anlage in einer Tiefe von 1,5 m und die in einer Entfernung von 10 m in einer Tiefe von 2 m. Diese Ringerder sollten durch umlaufende Verbindungsleiter mit dem ersten Ringleiter verbunden werden.

Wenn der Bereich um die bauliche Anlage mit einer 50 mm dicken Asphalt-schicht geringer Leitfähigkeit bedeckt ist, dann ist ein genügender Schutz für Personen gegeben, die diesen Bereich benutzen.

Dieses Ausführungsbeispiel wird in Beiblatt 1 zur DIN EN 62305-3 zusätzlich in zwei Bildern verdeutlicht, von denen Bild 120 hier in Abbildung 3.2 wiedergegeben ist.

Zusammenfassend lässt sich somit sagen, dass die Normenreihe DIN EN 62305 auf das Problem möglicherweise gefährlicher Schrittspannungen grundsätzlich hinweist. Sie gibt jedoch nur *Empfehlungen* dazu, wie diese gegebenenfalls vermieden werden können. Sie legt insbesondere *nicht* zwingend fest, unter welchen Umständen eine zusätzliche Potentialsteuerung anzuwenden ist, sie fordert keinen Nachweis darüber, welche konkreten Schrittspannungen auftreten und nennt auch keinen Schrittspannungsgrenzwert, der nicht überschritten werden darf.



**Abbildung 3.2.:** Skizze zur Ausführungsempfehlung der Norm von Ringerder-Anlagen zur Schrittspannungssteuerung (aus DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305), Beiblatt 1)

#### 3.2.2. Erdungsnormung für Mittel- und Hochspannungsanlagen

Zwar ist die Normreihe VDE 0101 (DIN EN 61936-1 und DIN EN 50522) für die Errichtung von Blitzschutzanlagen nicht unmittelbar relevant, jedoch beschäftigt sich insbesondere Teil 2 [VDE0101-2] intensiv mit Schritt- und Berührungsspannungen von Erderanlagen, weswegen diese Normen hier zum Vergleich herangezogen werden sollen.

Unter anderem definiert, im Gegensatz zur DIN-EN-62305-Reihe, die VDE 0101-2 den Begriff „Schrittspannung“  $U_S$  eindeutig als „Spannung zwischen zwei Punkten auf der Erdoberfläche, die 1 m voneinander entfernt sind, was als Schrittlänge eines Menschen angenommen wird“ (Begriff 3.4.16). In den Begriffsdefinitionen der VDE 0101-2 wird zwischen „Leerlauf-Berührungsspannung“  $U_{VT}$  (Spannung zwischen zwei berührbaren leitfähigen Teilen) und „Berührungsspannung“  $U_T$  (Spannung zwischen den Teilen bei tatsächlichem Berühren) unterschieden. Beim Begriff Schrittspannung ist dies nicht der Fall, jedoch ist in Bild 1 der Norm eine „Leerlauf-Schrittspannung“  $U_{VS}$  eingezeichnet.<sup>8</sup> In Anhang B (normativ) der Norm werden dazu nähere Erläuterungen gegeben und auch die Umrechnung zwischen  $U_{VT}$  und  $U_T$  beschrieben.

In Anlehnung an diese Begriffe in der Norm werden die entsprechenden Formulierungen auch in der vorliegenden Arbeit verwendet: Sofern nicht anders beschrieben, bezieht sich der Begriff „Schrittspannung“  $U_S$  stets auf diejenige Schrittspannung, die an einem Menschen tatsächlich anliegt (Zur besseren Unterscheidung wird stellenweise auch der Begriff „tatsächliche Schrittspannung“ verwendet). Für Spannungen, die ohne den Einfluss eines menschlichen Körpers gelten, also beispielsweise mit einem Voltmeter mit  $R_i \rightarrow \infty$  gemessen würden, werden die Begriffe „Leerlauf-Schrittspannung“ oder „prospektive Schrittspannung“  $U_{VS}$  verwendet.

Die Norm VDE 0101 liefert dazu – unter Verweis auf die IEC-60479-Reihe, siehe auch das nachfolgende Kapitel – maximal zulässige Berührungsspannungen in Abhängigkeit der Berührungsdauer und fordert den Nachweis, dass diese Werte eingehalten werden (Abschnitt 5.4 der Norm). Diese Angaben zu maximalen Berührungsspannungen sind jedoch für Betrachtungen von Blitzschutz-Erdungsanlagen nicht geeignet, da keine Werte für Zeitdauern unter 10 ms gegeben werden. Der Nachweis, dass die zulässigen Spannungen eingehalten werden, kann dabei durch Berechnung oder durch Messungen geführt werden. Zu Schrittspannungen führt die Norm aus:

In der Regel werden die Anforderungen zur Schrittspannung erfüllt, wenn die Anforderungen zur Berührungsspannung eingehalten werden, da die zulässigen Schrittspannungswerte, wegen der unterschiedlichen Strompfade durch den Körper, sehr viel größer als die Berührungsspannungswerte sind.

Dass dieser Ansatz aus physikalischer und medizinischer Sicht zulässig ist, wird in Kapitel 5 gezeigt.

<sup>8</sup>Dass die Unterscheidung zwischen Leerlaufspannung und tatsächlicher Spannung sinnvoll und notwendig ist, wird in Kapitel 6.1.4 gezeigt.

### 3.2.3. Elektrotechniknormen zur Strom-Wirkung auf Menschen

Im Normenwerk der IEC existiert die Reihe IEC 60479 (siehe [IEC60479-1] ff.), welche sich mit dem Einfluss elektrischen Stromes auf Menschen und Tiere beschäftigt. Es handelt sich dabei nicht um Normen im engeren Sinn, sondern um „*Technical Specifications*“ und „*Technical Reports*“, also technische Spezifikationen und Berichte. Seit einiger Zeit ist geplant, die Teile 1, 3 und 4 als Übersetzung in das VDE-Normenwerk zu übernehmen. Da diese sich jedoch bislang<sup>9</sup> noch im Stand von Vornormen befinden, soll hier und im weiteren Verlauf der Arbeit direkt die IEC-Reihe herangezogen werden.

Ogleich Teil 4 der Reihe den Untertitel „*Effects of lightning strokes*“ trägt, sich also explizit mit den Folgen von Blitzeinschlägen beschäftigt, ist dieses Dokument für die vorliegenden Untersuchungen nur von untergeordneter Bedeutung, da darin hauptsächlich phänomenologisch die „Übertragungsmechanismen“ von Blitzströmen auf Mensch und Tier (Direkteinschlag, Berührspannung, Schrittspannung usw.) sowie gesundheitliche Folgen solcher Ströme beschrieben werden. Diese Folgen werden in Teil 4 jedoch nicht quantifiziert, wodurch sich hieraus keine Grenzwerte ableiten lassen.

Hierzu müssen stattdessen die Teile 1 und 2 herangezogen werden. Teil 1 beschreibt unter anderem sehr ausführlich die Impedanz des menschlichen Körpers und deren Abhängigkeit von Frequenz und anliegender Spannung. Darauf aufbauend werden Grenzwerte für Berührspannungen genannt. Diese beziehen sich jedoch lediglich auf Gleichspannung und Netz-Wechselspannungen. Darüber hinaus erläutert Teil 1 das Konzept des Herzstromfaktors (Näheres hierzu siehe Kapitel 5.2.3).

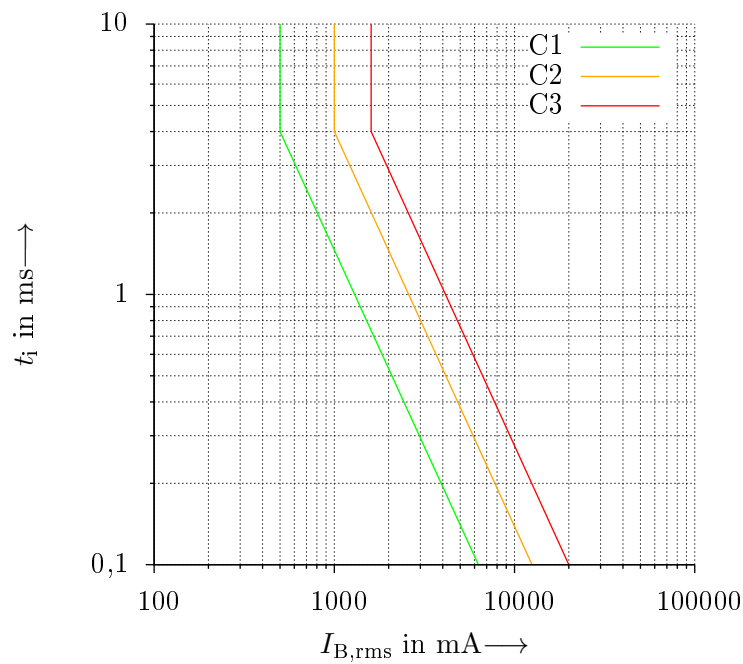
Teil 2 der Reihe schließlich befasst sich mit den Auswirkungen anderer Spannungs- und Stromformen wie hochfrequente Ströme, Schwingungspaketen und auch die für die Betrachtung von Blitzströmen relevanten kurzen monopolaren Impulse. Hierzu wird in einem Diagramm die Abhängigkeit zwischen dem Körperstrom  $I_B$ , der Stromflussdauer  $t_i$  und der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Herzkammerflimmern dargestellt. Dieses Diagramm ist hier in Abbildung 3.3 wiedergegeben.

Die Stromwerte beziehen sich dabei, wie bereits weiter oben beschrieben, auf den Strompfad von der linken Hand zu beiden Füßen. Zur näheren Erklärung und zur Anwendung dieser Kurven siehe Kapitel 5.

---

<sup>9</sup>Stand Juni 2013

### 3. Stand des Wissens und der Normung



- Unterhalb von C1: Kein Herzkammerflimmern
- Zwischen C1 und C2: Risiko für Herzkammerflimmern <5 %
- Zwischen C2 und C3: Risiko für Herzkammerflimmern <50 %
- Oberhalb von C3: Risiko für Herzkammerflimmern >50 %

**Abbildung 3.3.:** Zusammenhang zwischen dem Körperstrom, der Stromflussdauer und der Auftretswahrscheinlichkeit von Herzkammerflimmern für den Strompfad von der linken Hand zu beiden Füßen (aus IEC/TR 60479-2)

## 4. Motivation und Ziele der Arbeit

**Zusammenfassung:** *In diesem Kapitel wird kurz auf die Motivation der Arbeit und die grundsätzlichen Problemstellungen eingegangen. Darauf aufbauend wird ein grober Lösungsweg skizziert.*

Wie zunächst in Kapitel 2 beschrieben wurde, stellen Gewitter durch die bei einem Blitzeinschlag frei werdenden großen Energien eine Gefährdung von Menschenleben und Sachwerten dar. Aus diesem Grund ist es unbedingt empfehlenswert, Gebäude und ähnliche Strukturen vor Blitzeinschlägen zu schützen, was auch bereits seit über 250 Jahren praktiziert wird. (Für eine Darstellung der Geschichte des Blitzschutzes siehe z.B. HASSE und WIESINGER [HW93].)

Die Errichtung von Blitzschutzanlagen ist dabei in Deutschland seit längerem durch Normen geregelt, die bereits in Kapitel 3.2.1 vorgestellt wurden. Speziell zur Problematik der Schrittspannungen macht die Norm dabei jedoch relativ wenig konkrete Aussagen, empfiehlt aber im Bedarfsfall die Errichtung aufwändiger Ringerder-Anlagen. Hieraus ergeben sich jedoch mehrere Probleme und Fragestellungen:

1. Die von der Norm beschriebenen Ringerder-Anlagen haben eine große räumliche Ausdehnung. Dies führt zu einem hohen Materialbedarf und damit einhergehend zu einem hohen Kostenaufwand sowohl in Bezug auf das benötigte Material als auch in Bezug auf die Errichtungskosten. Zudem bietet die heutzutage in Deutschland häufig vorzufindende dichte Besiedlung oft nicht den eigentlich benötigten Raum, um solche Anlagen entsprechend den Norm-Vorgaben umzusetzen. Dadurch entsteht, nicht zuletzt von Errichter-Seite her, der Wunsch, kleinere und weniger aufwändige Erdungssysteme verwenden zu können.
2. Auch wenn längst nicht jede Blitzschutzanlage mit solchen Potentialsteuerungs-Maßnahmen zur Schrittspannungsbegrenzung versehen ist, sind Berichte über tatsächliche Unfälle mit blitzbedingten Schrittspannungen doch sehr selten. Eines der wenigen Beispiele ist der Unfall während eines Fußballtrainings am 8. 8. 2008 in Wald-Michelbach [ABB08]. Somit stellt sich die Frage, ob die Norm-Vorgaben möglicherweise deutlich überdimensioniert sind.
3. Die von der Norm gemachten Vorgaben entziehen sich einer unmittelbaren wissenschaftlichen Überprüfung, da die relevanten Normendokumente – wie in Normen üblich – keinerlei Quellenangaben enthalten. Dadurch ist keine Ad-

#### 4. Motivation und Ziele der Arbeit

hoc-Aussage darüber möglich, ob die Ringerder-Anlagen nach Norm zu groß, genau richtig oder möglicherweise sogar zu klein dimensioniert sind. Selbst wenn die in Kapitel 3.1.2 geäußerte Vermutung über die Quelle der Norm-Angaben zuträfe, bliebe die Frage, ob die angesprochenen Vereinfachungen der analytischen Ansätze nicht doch zu große Abweichungen liefern.

4. Schließlich stellt sich noch die Frage nach gerade noch ungefährlichen Schrittspannungen: In der Blitzschutznorm werden keinerlei diesbezüglich einzuhaltende Grenzwerte genannt. Die in Kapitel 3.2.3 vorgestellten IEC-Dokumente zur Wirkung auf den Menschen sind für Deutschland streng genommen nicht relevant, da sich die Übersetzungen des VDE zur Zeit immer noch im Status einer Vornorm befinden.

Zum letzten Punkt ist noch anzumerken, dass die Auswirkungen von Berührspannungen bei Gleichspannungen und netzfrequenten Wechselspannungen in der Vergangenheit umfangreich erforscht wurden. Diese Ergebnisse, auch im Hinblick auf maximal zulässige Spannungen und Durchströmungsdauern, sind wohldokumentiert und haben ihren Einzug in die einschlägige Normung gefunden, beispielsweise in die DIN VDE 0100-140. Jedoch bringen demgegenüber durch Blitzströme verursachte Schrittspannungen einige Besonderheiten mit sich, die signifikant von den zuvor genannten Grenzwerten abweichen:

- Sehr kurze Zeitdauern im Mikro- bis Millisekunden-Bereich,
- monopolare Impulse und
- ein Strompfad im menschlichen Körper von Fuß zu Fuß.

Aus diesen offenen Fragen leiten sich somit unmittelbar die Aufgabenstellungen für die vorliegende Arbeit ab: Zunächst soll ein Grenzwert für maximal zulässige Schrittspannungen gefunden werden. Dazu muss die Wirkung des elektrischen Stromes unter den vorgenannten Rahmenbedingungen auf den menschlichen Körper untersucht werden, wobei Experimente aus offensichtlichen Gründen nicht in Frage kommen. Stattdessen wurde der Weg einer Literaturrecherche gewählt, wobei darauf geachtet wurde, möglichst mehrere, voneinander unabhängige Quellen heranzuziehen und zu vergleichen. Als zusätzlicher Weg der Bestimmung wurden – als Novum – in enger Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet „Theorie Elektromagnetischer Felder“ (TEMF) der TU Darmstadt die elektrische Durchströmung des menschlichen Körpers mit einem vollen 3D-Körper-Modell simuliert.

Nach der Festlegung eines Grenzwertes sollen Erdungsanlagen untersucht werden. Da, wie bereits geschrieben, experimentelle Untersuchungen von Anlagen in voller räumlicher Ausdehnung und mit den vollen in der Norm vorgesehenen Prüfströmen einen immensen Aufwand an Prüftechnik verbunden wären, um die benötigten Energien über Stoßkreise bereitzustellen, kommen auch hier Experimente nicht in Frage. Auch Untersuchungen an Modellen, die räumlich und/oder in Bezug auf



die Prüfströme verkleinert sind, stellen keine optimale Lösung dar, da hier angezweifelt werden muss, ob Nichtlinearitäts-Effekte wie die in Kapitel 3.1.4 angesprochene Bodenionisation korrekt im Modell abgebildet werden könnten. Da analytische Ansätze, wie nicht zuletzt das Beispiel von KOCH (vgl. Kapitel 3.1.2) zeigt, trotz ihrer Komplexität mit Näherungen und Ungenauigkeiten behaftet sind, bleibt als zu wählender Lösungsansatz die Computer-Simulation. Zwar gibt es am Markt speziell auf Erdungsprobleme ausgelegte Berechnungs-Software wie beispielsweise *GSA* des Herstellers *SINT Ingegneria*, jedoch handelt es sich hierbei um Lösungen, die für die Berechnung von Betriebserdern (also für netzfrequente Erderströme) in Schaltanlagen vorgesehen sind und daher lediglich Software-Implementierungen der (Näherungs-)Berechnungsformeln aus den einschlägigen Normen wie beispielsweise IEEE 80-2000 [GSA13] darstellen. Somit fiel die Wahl auf 3D-FEM-Feldsimulationssoftware, die in Verbindung mit aktuellen, leistungsfähigen Computern prinzipiell in der Lage ist, auch komplexe Probleme wie eine Erdungsanlage zu lösen und dabei auf Wunsch auch Nichtlinearitäten (siehe Bodenionisation) berücksichtigen kann.

Bei der Untersuchung von Erdungsanlagen sollen zunächst „konventionelle“, also in den Blitzschutznormen beschriebene und aktuell in der Praxis üblicherweise verwendete Erdungskonzepte betrachtet und diese hinsichtlich ihrer Wirksamkeit im Hinblick auf Schrittspannungssteuerung, speziell im Vergleich mit dem festzulegenden Schrittspannungs-Grenzwert, bewertet werden. Sollten sich die konventionellen Erdungskonzepte als nicht ausreichend wirksam erweisen, soll nach neuen, „nichtkonventionellen“ Lösungen gesucht werden. Sollten sich die konventionellen Erdungskonzepte dagegen als überdimensioniert erweisen, soll nach kleineren, weniger aufwändigen Lösungen gesucht werden.

Bei allen beschriebenen Aufgabenstellungen konzentriert sich diese Arbeit ausschließlich auf Probleme rund um Schrittspannungen. Andere Aspekte und Ziele bei der Auslegung von äußeren Blitzschutzanlagen wie Berührspannungen oder Stoßerdungswiderstände sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.



## 5. Medizinische Aspekte

**Zusammenfassung:** *In diesem Kapitel werden zunächst einige allgemeine medizinische Grundlagen zur Wirkung des elektrischen Stromes auf den menschlichen Körper erläutert. Es wird begründet, warum das Herz das entscheidende Organ bei Sicherheitsbetrachtungen über den elektrischen Strom ist und welche besonderen Aspekte dabei zu beachten sind. Schließlich wird unter Heranziehung mehrerer voneinander unabhängiger Methoden ein Vorschlag für einen Schrittspannungs-Grenzwert hergeleitet.*

Als Vorbemerkung zu diesem Kapitel muss festgehalten werden, dass aus offensichtlichen Gründen nur vergleichsweise wenige seriöse wissenschaftliche Untersuchungen existieren, die sich mit dem Einfluss elektrischen Stromes, insbesondere größerer Ströme, auf den menschlichen Körper befassen. Eine der wenigen dem Autor bekannten Quellen hierzu ist die Arbeit von SAM, der in den 1960er Jahren an Leichen forschte [Sam65]. Ausführlichere Daten liegen stattdessen aus Tierversuchen vor. Als Versuchstiere wurden dabei häufig Hausschweine verwendet, da diese als dem Mensch physiologisch besonders ähnlich gelten [JBRW74]. Exemplarisch können hier die Arbeiten von KUPFER genannt werden [SK71], [Kup71], [Kup81]. Auch Schafe wurden vergleichsweise häufig als Versuchstiere verwendet, wie beispielsweise von FERRIS et al. [FKSW36].

An gegebener Stelle wird auf diese Untersuchungen noch detaillierter verwiesen.

Zudem wird in der Medizin hauptsächlich der durch den Körper fließende Strom – statt der am Körper anliegenden Spannung – als Auslöser für alle zu betrachtenden Effekte angesehen. Entsprechend stellen medizinische Veröffentlichungen auf den Strom ab, wodurch es einer geeigneten Umrechnung in Spannungswerte bedarf, da letztere für Erdungs- und Schrittspannungs-Fragestellungen einfacher zu handhaben sind.

### 5.1. Allgemeine Auswirkungen des elektrischen Stromes auf den menschlichen Körper

Die Wirkung elektrischen Stromes, der durch den menschlichen Körper fließt, lässt sich in zwei wesentliche Kategorien einteilen: Wärmewirkung und Reizwirkung. Hinzu kommen weitere, mittelbare Auswirkungen von Lichtbögen beziehungsweise Blitzen auf den menschlichen Körper. Dies soll im Folgenden näher erläutert werden.

### 5.1.1. Wärmewirkung

Fließender Strom  $I$  erzeugt nach dem Jouleschen Gesetz stets eine Wärmemenge  $Q$ , die außerdem zum ohmschen Widerstand  $R$  und der Stromflussdauer  $t$  proportional ist:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (5.1)$$

Diese Wärmemenge erhitzt das Körpergewebe lokal entlang des Strompfades und kann dadurch, abhängig von den Parametern  $I$  und  $t$ , Verbrennungen beliebiger Schwere hervorrufen. Schwere Verbrennungen werden hauptsächlich von Personen berichtet, die in Unfälle in elektrischen Anlagen verwickelt waren, also in der Regel Gleichspannung oder netzfrequenten Wechselspannungen ausgesetzt waren, indem sie elektrisch aktive Teile direkt berührt haben. (Siehe hierzu beispielsweise [KFE87].)

Darüber hinaus können Verbrennungen auch durch Lichtbögen hervorgerufen werden: sowohl durch die reine Wärmestrahlung eines Bogens als auch durch einen auf dem Körper befindlichen Lichtbogenfußpunkt, welcher Temperaturen bis zu mehreren 1000 °C erreichen kann. Solche Verbrennungen werden auch im Zusammenhang mit Blitzunfällen, speziell dem Direkteinschlag (vgl. Kapitel 5.4.1) berichtet. Desweiteren können Verbrennungen auch durch metallische Gegenstände am Körper wie Halsketten, Ringe etc., die sich durch Stromfluss erhitzen, verursacht werden.

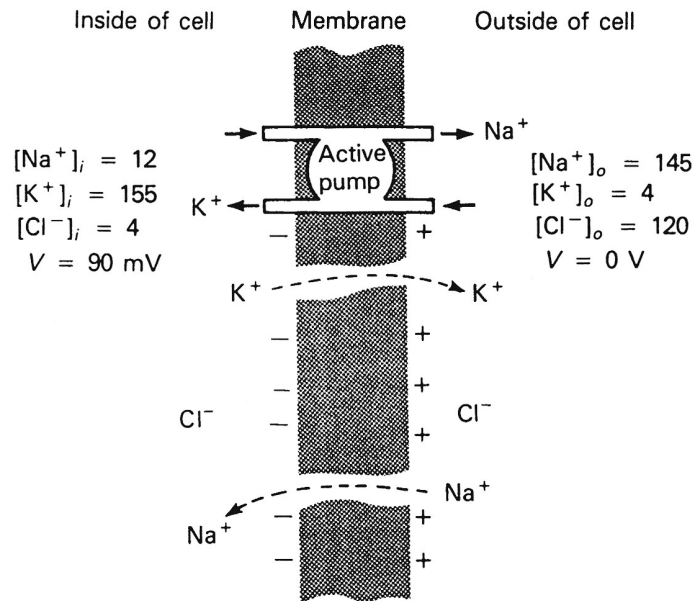
Eine besondere Art der Verbrennung sind sogenannte Lichtenberg-Figuren. Hierbei handelt es sich um baum- beziehungsweise farnblattartig verzweigte Muster von Rötungen auf der Haut, welche ausschließlich bei Blitzunfällen beobachtet werden. Lichtenberg-Figuren stellen nur eine sehr leichte Verbrennung (1. Grades) dar, und werden von manchen Autoren gar nicht den Verbrennungen im medizinischen Sinn zugeordnet. Sie bilden sich in der Regel nach 24 bis 48 Stunden von selbst zurück [ACDM92].

### 5.1.2. Reizwirkung

Um die Reizwirkung elektrischen Stromes auf den Körper zu verstehen, ist es zunächst notwendig, kurz die Funktion von Nerven beziehungsweise Nervenzellen zu betrachten. Für weiterführende Erläuterungen sei an dieser Stelle auf entsprechende Fachliteratur verwiesen [Rei98], [KSJ00].

Nerven und Muskeln bestehen wie der komplette restliche menschliche Körper aus einzelnen Zellen. Jede einzelne Zelle besitzt eine sogenannte Zellmembran als äußere Hülle, welche wenige Nanometer dick ist. Diese Zellmembran ist semipermeabel, das heißt, Ladungsträger können sie in der Regel nur in einer Richtung passieren. Da sich sowohl im Zellinneren als auch in den Zellzwischenräumen hauptsächlich Wasser befindet, in dem verschiedene Ionen gelöst sind, sorgt die semipermeable Eigenschaft der Zellmembran dafür, dass sich im Inneren und Äußeren der Zelle unterschiedliche Ionenkonzentrationen ausbilden. Abbildung 5.1 verdeutlicht dies.

## 5.1. Allgemeine Auswirkungen des elektrischen Stromes auf den menschlichen Körper



**Abbildung 5.1.:** Schema der Ionenkonzentrationen und Ladungsverhältnisse an einer Zellmembran. Die Zahlwerte geben ungefähre Ionenkonzentrationen in  $\mu\text{mol}/\text{cm}^3$  für den Ruhezustand einer Muskelzelle an. (aus [Rei98])

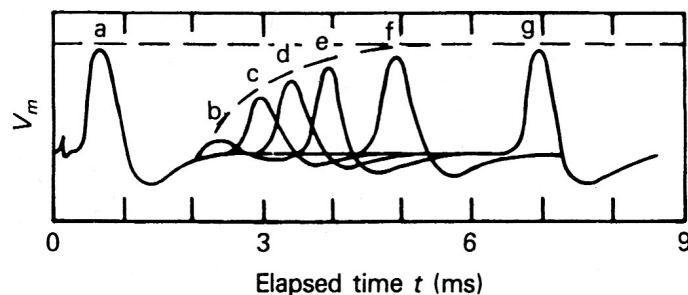
Durch die unterschiedliche Ionenkonzentration innerhalb und außerhalb der Zelle ist die Zellwand polarisiert, und es baut sich ein elektrisches Potential auf, das bei menschlichen Zellen typischerweise ca.  $-90 \text{ mV}$  gegenüber dem Außenraum beträgt. (In Abbildung 5.1 bzw. [Rei98] etwas missverständlich dargestellt.) Dieses elektrische Potential wird Membranpotential oder auch Ruhepotential genannt.

Sobald ein äußerer Reiz, der elektrischer oder chemischer Natur sein kann, auf die Zelle einwirkt, verändert sich die Leitfähigkeit der Zellwand. Ist der äußere Reiz größer als die sogenannte Membranschwelle, setzt sich dieser Effekt lawinenartig durch die komplette Zellwand fort, und die Zelle nimmt kurzzeitig ein um einige  $10 \text{ mV}$  höheres Potential an. Dieses wird „Aktionspotential“ genannt und ist positiv gegenüber dem Zellaußenraum. Bleibt der Reiz in seiner Intensität jedoch unter dem Schwellenwert, reagiert die Zelle nur sehr schwach oder gar nicht. Man spricht in diesem Zusammenhang von einem „Alles oder nichts“-Verhalten der Zelle [KFE87].

Der Prozess des relativ starken Sprungs auf das Aktionspotential wird Depolarisation genannt. Sofort nach der Depolarisation beginnt die sogenannte Repolarisation, bei der das Zellpotential wieder auf das Ruhepotential sinkt. Nach Erreichen des Ruhepotentialwertes schwingt das Zellpotential jedoch noch durch und nähert sich nur langsam dem endgültigen Ruhepotential an. In diesem Zustand wird die Zelle als refraktär bezeichnet und reagiert nicht auf weitere äußere Reize. Die Nervenzellen von Säugetieren bei Körpertemperatur sind für einen Zeitraum von etwa  $0,5 \text{ ms}$  nach

## 5. Medizinische Aspekte

einem Reiz „absolut refraktär“, das heißt, sie reagieren überhaupt nicht auf weitere Reize. Danach wird die Zelle „relativ refraktär“ und reagiert zunächst schwach und mit zunehmender Wartezeit immer stärker auf weitere Reize, bis nach einigen weiteren Millisekunden wieder die volle Reizempfindlichkeit hergestellt ist. Abbildung 5.2 zeigt dieses Verhalten: Hierbei wird immer bei  $t = 0$  ein erster Reiz auf die Zelle angewendet, der die Reaktion *a* hervorruft. Danach wird mit unterschiedlich langen Wartezeiten ein Folgereiz erzeugt, der seinerseits jeweils die Reaktionen *b* bis *g* hervorruft. Wie zu erkennen ist, reagiert die Zelle dabei nach kurzen Zeitintervallen nur schwach, bis schließlich die Reaktion *g* das gleiche Aktionspotential wie bei *a* erreicht [Rei98].



**Abbildung 5.2.:** Reaktionsfähigkeit als Membranpotentiale  $V_m$  der Nervenzelle eines Frosches auf Folge Reize. Zum Zeitpunkt  $t = 0$  wird ein erster Reiz mit der Reaktion *a* erzeugt. Mit zunehmendem Zeitverzug wird ein zweiter Reiz erzeugt, welcher jeweils die Reaktionen *b* bis *g* hervorruft.  
(aus [Rei98] bzw. nach [Kat66])

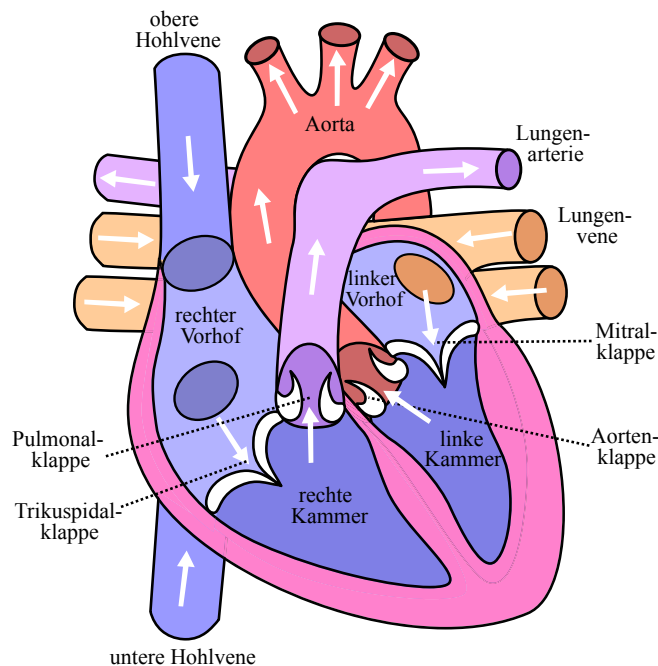
Bei der Reaktion der Zelle auf einen Reiz macht es dabei keinen Unterschied, ob der Reiz von einer externen oder körpereigenen Quelle stammt. Die betroffenen Nervenzellen und -fasern werden den Reiz, sofern er über dem erforderlichen Schwellenwert liegt, immer weiterleiten. Auch die Aktivierung von Muskeln funktioniert nach diesem Prinzip. Dabei sind die Auswirkungen des Reizes unter anderem von der Stromstärke abhängig: Unterhalb der sogenannten Wahrnehmbarkeitsschwelle ist für den Menschen keinerlei Wirkung spürbar. Darüber werden zunächst Nerven gereizt, sodass beispielsweise ein Kribbeln spürbar ist. Mit weiter zunehmender Stromstärke werden auch Muskeln gereizt, sodass es auch zu Muskelzuckungen und -krämpfen kommt. Ist bei einer Berührung der elektrisch aktiven Teile mit der Hand auch die sogenannte Loslassschwelle überschritten, verkrampt die Handmuskulatur so stark, dass ein Loslassen nicht mehr möglich ist. Zur konkreten Ermittlung dieser Schwellenwerte wurden in Abhängigkeit diverser Parameter wie Frequenz und Geschlecht zahlreiche Versuchsreihen durchgeführt, beispielsweise von *Dalziel* [DM50b], [DM50a], [DM56], [DOA43].

Auf das Herz als Sonderfall eines Muskels wird im folgenden Kapitel 5.2 näher eingegangen.

## 5.2. Besonderheiten des Herzens

Obwohl einige der vorgenannten möglichen Verletzungen durch elektrischen Strom im Allgemeinen und Blitze im Besonderen durchaus lebensbedrohliche Ausmaße annehmen können (beispielsweise schwere Verbrennungen), ist jedoch offensichtlich, dass Beeinträchtigungen des Herzens unmittelbare Lebensgefahr bedeuten und einer sofortigen Behandlung (zunächst durch Sofortmaßnahmen am Unfallort und möglichst schnell danach durch medizinisches Fachpersonal) bedürfen. Daher ist dem Herzen dieses separate Kapitel gewidmet. Zum besseren Verständnis sollen auch hier kurz einige allgemeine Aspekte erklärt werden. Für tiefergehende Erläuterungen sei ebenfalls auf entsprechende Fachliteratur verwiesen [Ant98], [Kat05].

Das Herz besteht im Wesentlichen aus Muskelmasse und umschließt insgesamt vier Hohlräume: jeweils zwei Herzkammern und zwei Vorhöfe. Dabei sind der rechte Vorhof und die rechte Herzkammer dafür zuständig, Blut von der oberen und unteren Hohlvene über die Lungenarterie in die Lunge zu pumpen, während der linke Vorhof und die linke Herzkammer Blut von den Lungenvenen über die Aorta in den übrigen Körper pumpen (vgl. Abbildung 5.3). Dementsprechend ist das Herz für die Aufrechterhaltung des Blutkreislaufs und damit für die Versorgung des kompletten Körpers mit Sauerstoff und Nährstoffen zuständig.

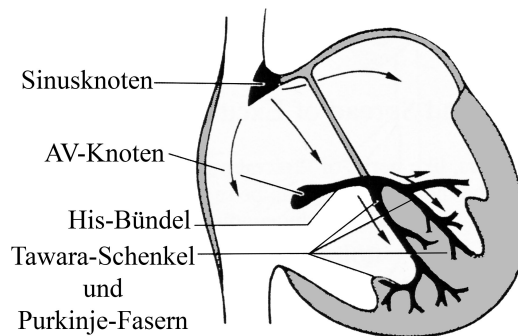


**Abbildung 5.3.:** Schematischer Aufbau des menschlichen Herzens (Quelle: [Jak08])

### 5.2.1. Reizleitungssystem des Herzens

Das Reizleitungssystem im Herzen besteht aus mehreren Elementen. Das geometrisch höchste und hierarchisch wichtigste Element ist dabei der Sinusknoten, der als sogenannter primärer Schrittmacher dient und im Normalfall den Herzschlag steuert, wobei der vom Sinusknoten erzeugte Ruhepuls bei einem erwachsenen Menschen zwischen 60 und 80 Schlägen pro Minute liegt. Vom Sinusknoten aus breitet sich die Erregungswelle zunächst durch das Herzmuskelgewebe (Myokard) der beiden Vorhöfe aus, hin zum Atrioventrikularknoten (auch „AV-Knoten“ oder „Aschoff-Tawara-Knoten“). Fällt der Sinusknoten aus oder ist die Nervenverbindung vom Sinusknoten zum AV-Knoten unterbrochen (sinuatrialer Block), übernimmt der AV-Knoten als sogenannter sekundärer Schrittmacher die Steuerung des Herzschlages mit einer Frequenz von etwa 40 bis 60 Schlägen pro Minute. Vom AV-Knoten setzt sich das Reizleitungssystem über das His-Bündel fort. Sollte auch der AV-Knoten ausfallen (atrioventrikulärer Block), kann das His-Bündel als tertiärer Schrittmacher die Steuerung des Herzens übernehmen. Dies geschieht allerdings mit einer niedrigeren Frequenz von lediglich 30 bis 40 Schlägen pro Minute. An das His-Bündel schließen sich schlussendlich noch die sogenannten Tawara-Schenkel und Purkinje-Fasern an, welche die Reize des Sinusknotens an die Herzmuskulatur weiterleiten. Auch diese Teile des Reizleitungssystems sind dahingehend redundant und vermascht ausgebildet, dass bei Ausfall einzelner Teile der Tawara-Schenkel oder Purkinje-Fasern die Reize über andere Teile oder direkt über die Muskelmasse weitergeleitet werden können.

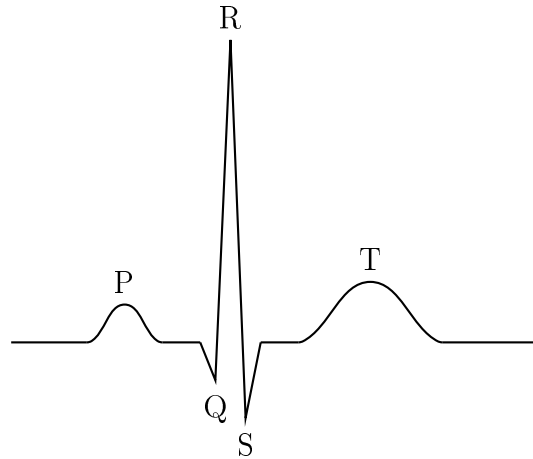
Dabei ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Reizleitungssystem mit ca. 2 m/s höher als in den Herzmuskelfasern mit ca. 1 m/s. Zusammen mit dem besonderen Aufbau der Herzmuskelfasern sorgt dies dafür, dass das Herz zum einen im Normalfall kontrolliert schlägt und zum anderen als Ganzes (wie eine einzelne Zelle, vgl. Kapitel 5.1.2) ein „alles oder nichts“-Verhalten zeigt [Ant98].



**Abbildung 5.4.:** Reizleitungssystem des menschlichen Herzens (aus [Ant98])

Die elektrische Aktivität des Herzens lässt sich mit entsprechend empfindlichen Messgeräten als Elektrokardiogramm (EKG) auf der Brust detektieren. Der sogenannte Sinusrhythmus, also der zeitliche Verlauf eines EKG im Normalfall ist schematisch in Abbildung 5.5 zu sehen.





**Abbildung 5.5.:** Typischer Verlauf eines Elektrokardiogramms mit Benennung der markanten Punkte

Dabei entsprechen die einzelnen markierten Punkte folgenden Aktivitäten im Herz:

**P-Welle** Erregungsausbreitung in den Vorhöfen

**PQ-Strecke** Erregungsrückbildung in den Vorhöfen

**QRS-Komplex** Erregungsausbreitung in den Herzkammern

**ST-Strecke** Volle Erregung der Herzkammern

**T-Welle** Erregungsrückbildung in den Herzkammern

Das PQ-Intervall, also die Kombination aus P-Welle und PQ-Strecke, dauert dabei normalerweise unter 0,2s. Die Dauer des QT-Intervalls (Q-Zacke bis Ende der T-Welle) hängt von der Pulsfrequenz ab und variiert zwischen ca. 0,5s bei einem Puls von 40/min und ca. 0,2s bei 180/min.

Kommt es nun zu einer Fremderregung des Herzens durch einen externen elektrischen Strom, kann dies, sofern es sich um einen eher kurzen Impuls handelt und falls dieser zwischen zwei reguläre Herzschläge fällt, einen zusätzlichen Herzschlag (sog. Extrasystole) auslösen. Ein größerer Strom kann auch einen Herzstillstand (Arrhythmie) auslösen. Handelt es sich hierbei nur um einen kurzen Impuls, kann auf Grund der oben beschriebenen sekundären und tertiären Schrittmacher das Herz unter Umständen nach kurzer Zeit selbstständig und spontan wieder regulär zu schlagen beginnen.

### 5.2.2. Entstehung und Auswirkung von Herzkammerflimmern

Abweichend von dem im vorherigen Kapitel Geschriebenen kann es unter bestimmten Bedingungen dennoch zu Problemen bei der Reizausbreitung im Herzen kommen.

## 5. Medizinische Aspekte

In Abbildung 5.6 ist dies für den Fall eines verkürzten Erregungsimpulses skizziert: Die dreieckige Struktur stellt dabei einen vereinfachten und stark vergrößerten Ausschnitt aus dem Reizleitungssystem einer Herzkammer (Purkinje-Fasern) dar, in dem die einzelnen Leitungen durch ihre gegenseitige Vermaschung eine ringförmige Leiterstruktur bilden.

In der linken Spalte von Abbildung 5.6 ist dabei der Normalzustand dargestellt: Die Reizwelle läuft in die Dreiecksstruktur und teilt sich auf beide Schenkel auf. Dabei werden die Zellen dort polarisiert und dadurch absolut refraktär (durch schwarze Färbung symbolisiert). Im unteren Schenkel treffen die beiden Teilwellen wieder aufeinander. Da in diesem Moment beide Seiten noch absolut refraktär sind, können sich die beiden Teilwellen zur Mitte hin nicht weiter ausbreiten, wodurch sich die Erregung in die benachbarten Strukturen des Reizleitungssystems fortsetzt.

In der mittleren Spalte ist der Fall einer stark verkürzten Reizwelle dargestellt. Auch diese Welle teilt sich auf die beiden Schenkel auf und vereinigt sich im unteren Schenkel wieder. Die Zone der relativen Refraktivität (gestrichelt dargestellt) folgt dabei unmittelbar. Da die beiden Seiten jedoch ungefähr gleich stark refraktär sind, breitet sich auch hier die Reizwelle in die benachbarten Strukturen aus.

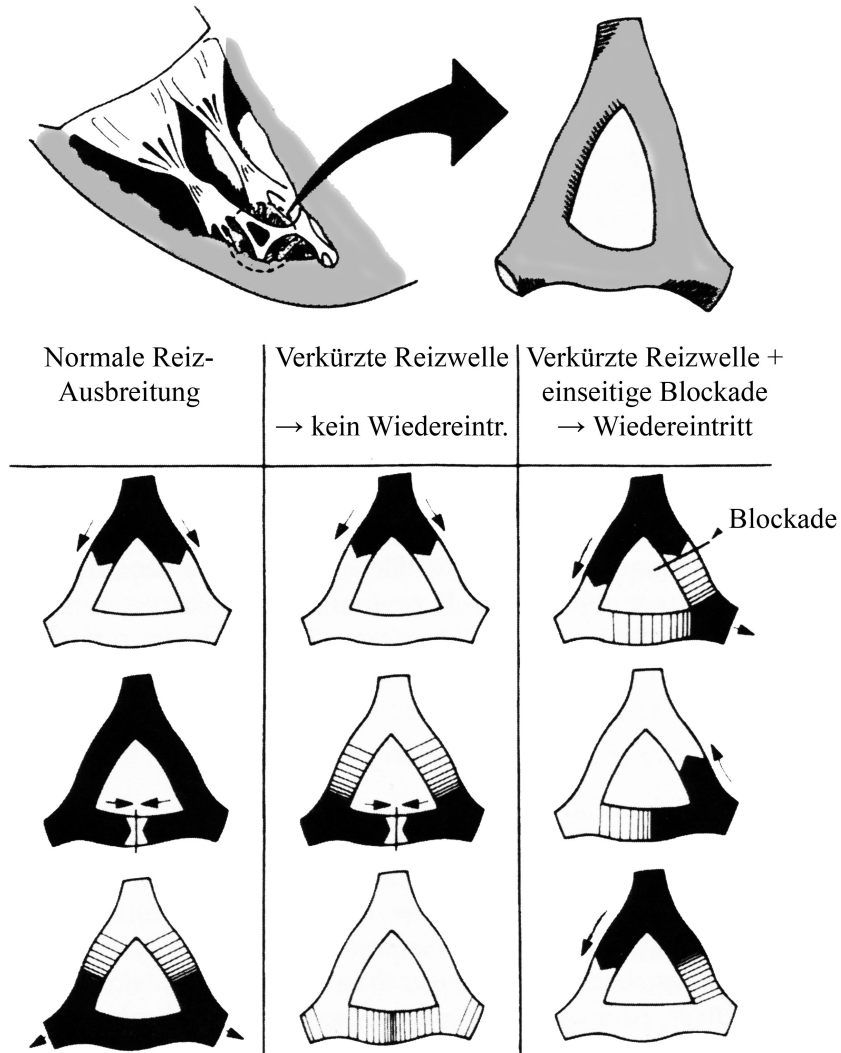
In der rechten Spalte schließlich ist einer der beiden Schenkel der Dreiecksstruktur beim Einlaufen der Reizwelle noch absolut refraktär, beispielsweise durch einen vorherigen Reiz. Die einlaufende Reizwelle kann daher nur den Weg über den anderen Schenkel nehmen. Ist diese jedoch im unteren Schenkel angekommen, ist der ursprünglich blockierte Schenkel nicht mehr refraktär und die Reizwelle kann in ihm zurücklaufen, sodass sich ein Kreislauf ergeben kann. Tritt dieser Fall ein, wird die Herzkammermuskulatur durch die schnell im Kreis laufende Reizwelle nur noch unvollständig erregt, zuckt nurmehr unkontrolliert und kann kein Blut mehr pumpen. Man spricht hierbei von Herzkammerflimmern<sup>1</sup> (ventrikuläre Fibrillation). Dieser Zustand ist unmittelbar lebensbedrohlich, da durch die fehlende Pumpleistung des Herzens der Blutkreislauf zusammenbricht. Zudem kann sich das Herz – im Gegensatz zu einem Herzstillstand, vgl. vorheriges Kapitel – nicht selbstständig aus diesem Zustand befreien. Nur eine sogenannte Defibrillation durch einen gezielt von außen angewendeten Stromstoß löst sozusagen einen Reset des Herzens aus, sodass der Sinusknoten wieder die Steuerung der Herzfunktion übernehmen kann. Bis zur Defibrillation muss die Zeit mit Herz-Lungen-Wiederbelebung überbrückt werden, um insbesondere die Sauerstoffzufuhr zum Gehirn aufrecht zu erhalten.

Herzkammerflimmern kann jedoch auch durch externe Einflüsse ausgelöst werden, wie Abbildung 5.7 zeigt.

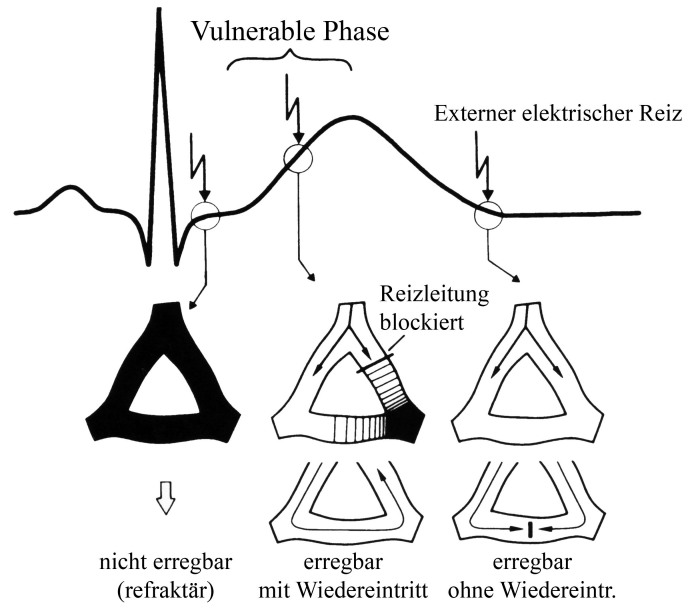
Während der T-Welle des EKG bildet sich die Erregung der Herzkammern zurück (vgl. vorheriger Abschnitt), und die Zellen des Reizleitungssystems befinden sich in einem relativ refraktären Zustand. Trifft genau während dieser Zeit ein externer elektrischer Reiz auf das Herz, kann es ebenfalls zu einem Wiedereintritt der dadurch ausgelösten Erregungswelle im Reizleitungssystem kommen, was ebenso zu Kammer-

---

<sup>1</sup>Der Name leitet sich davon ab, dass bei einem offenliegenden Herz die Muskelzuckungen wie ein Flimmern der Oberfläche des Herzens wahrnehmbar sind.



**Abbildung 5.6.:** Prinzipielles Entstehen von Herzkammerflimmern: Skizze eines schleifenförmigen Ausschnitts aus dem Herzkammer-Reizleitungssystem. Absolut refraktäre Zonen sind schwarz eingezeichnet, relativ refraktäre Zonen gestrichelt. Weitere Erklärungen siehe Text. (übersetzt aus [Ant98])



**Abbildung 5.7.:** Entstehen von Herzkammerflimmern durch externe Reize, analog zu Abbildung 5.6. Weitere Erklärungen siehe Text.  
(übersetzt aus [Ant98])

flimmern führt. Da dies nur während der T-Welle möglich ist, spricht man hier auch von der „vulnerablen Phase“ des Herzens, deren Dauer ungefähr einem Drittel der gesamten Periode entspricht. Außerhalb der vulnerablen Phase ist das Reizleitungssystem entweder absolut refraktär (z. B. während des QRS-Komplexes), sodass es auf den externen Reiz gar nicht reagiert, oder aber die Zellen des Reizleitungssystems befinden sich zwischen zwei Herzschlägen auf Ruhepotential, sodass ein externer Reiz lediglich eine Extrasystole auslöst.

### 5.2.3. Herzstromfaktoren

Für die Intensität der Auswirkungen auf das Herz ist es offensichtlich, dass hierzu nicht der komplette durch den menschlichen Körper fließende Strom eine Rolle spielt, sondern vielmehr nur derjenige Teil des Stromes, der tatsächlich durch das Herz fließt. Dabei ist zu erwarten, dass bei einem Strom, der beispielsweise von Hand zu Hand fließt, ein sehr großer Teil des Gesamtstromes auch durch das Herz fließt, da dieses im Hauptstrompfad durch den Brustkorb liegt. Umgekehrt ist zu erwarten, dass sich ein Strom, der von Fuß zu Fuß fließt (wie dies bei einer anliegenden Schrittspannung der Fall ist), im Torso hauptsächlich auf den Unterleib konzentriert und somit nur ein geringer Anteil des Gesamtstroms durch das Herz fließt.

Diesen Zusammenhang erkannte bereits SAM und führte daher sogenannte Herzstromfaktoren  $k_H$  ein, um diese Effekte zu berücksichtigen [Sam65]. Hierbei wird eine Körperdurchströmung von der linken Hand zu einem oder beiden Füßen mit

### 5.3. Elektrischer Widerstand des menschlichen Körpers

dem Faktor 1 gewichtet. Für andere Durchströmungspfade im Körper lässt sich mit  $k_H$  berechnen, um wieviel der Gesamtkörperstrom  $I$  größer oder kleiner als der Referenzkörperstrom  $I_{\text{ref}}$  von der linken Hand zu den Füßen sein muss, um im Herz den gleichen Effekt zu erzielen:

$$I = \frac{I_{\text{ref}}}{k_H} \quad (5.2)$$

Konkrete Werte für  $k_H$  wurden dabei von SAM für zahlreiche unterschiedliche Strompfade an menschlichen Leichen ausgemessen. Diese Werte, welche in Tabelle 5.1 wiedergegeben sind, können somit als gesichert angenommen werden. Dabei ist allerdings zu beachten, dass SAM *keinen* Herzstromfaktor für den Strompfad Fuß–Fuß angegeben hat.

Tabelle 5.1 findet sich in gekürzter und zusammengefasster Form auch in IEC/TS 60479-2 als *Table 12* wieder, wobei die Herzstromfaktoren hier allerdings mit dem Formelzeichen  $F$  bezeichnet werden. Die genannten Zahlenwerte sind dabei identisch, jedoch ist hier zusätzlich zu den von SAM ermittelten Werten ein Herzstromfaktor von 0,04 für den Strompfad Fuß–Fuß angegeben. Dieser Wert konnte vom Autor nicht an Hand von Primärquellen verifiziert werden, daher wird er in Kapitel 5.5 zunächst nur unter Vorbehalt verwendet. Im Hinblick auf Tabelle 5.1 wird auch deutlich, dass eine Berührungsspannung, also eine Durchströmung Hand–Füße immer deutlich gefährlicher ist als eine Durchströmung Fuß–Fuß. Vor diesem Hintergrund ist auch die in Kapitel 3.2.2 genannte Annahme der Norm VDE 0101, dass bei einer Einhaltung von Berührungsspannungsgrenzwerten automatisch auch ein Schutz vor gefährlichen Schrittspannungen gegeben ist, weitgehend zutreffend<sup>2</sup>.

### 5.3. Elektrischer Widerstand des menschlichen Körpers

Wie bereits erwähnt, und wie besonders in Kapitel 5.5 noch zu sehen sein wird, wird die medizinische Wirkung von Elektrizität hauptsächlich an Hand des fließenden (Körper-)Stromes beurteilt. Andererseits ist für die Bewertung von Erdungsanlagen eine Schrittspannung zweckmäßig. Eine Umrechnung über die körpereigene Impedanz mit Hilfe des ohmschen Gesetzes ist dabei zwar im Prinzip trivial, erfordert aber eine Quantifizierung der Körperimpedanz.

Die Körperimpedanz setzt sich im Wesentlichen aus zwei Teilen zusammen:

1. Die Impedanz der Haut, gemischt resistiv und kapazitiv
2. Die innere Körperimpedanz, hauptsächlich resistiv

Messungen dieser Impedanzen wurden in der Vergangenheit unter anderem von FREIBERGER, OSYPKA und SAM durchgeführt [Fre34], [Osy62], [Sam65]. Diese Wer-

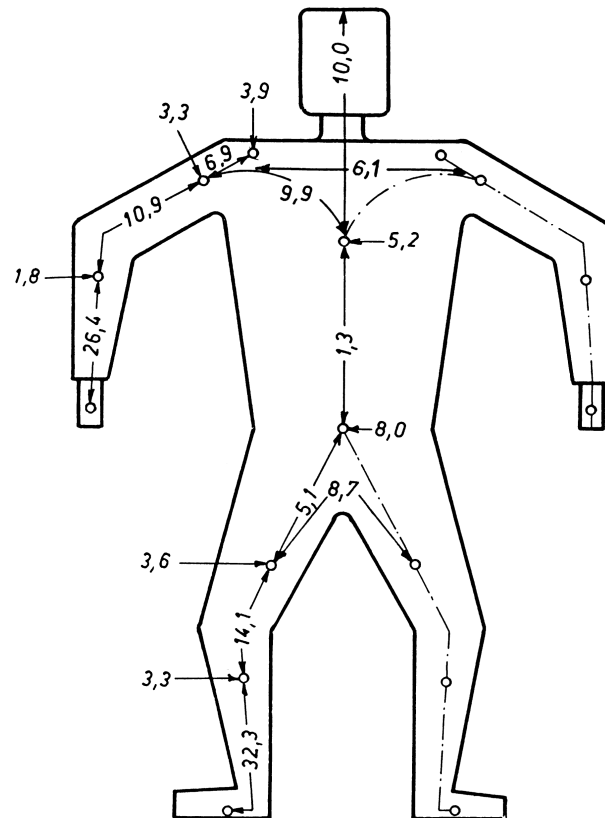
---

<sup>2</sup>Zumindest solange von einem ausgedehnten, vermaschten Erdungssystem ausgegangen werden kann, was in Schaltanlagen, auf die sich die Norm VDE 0101 bezieht, der Fall ist.

**Tabelle 5.1.:** Herzstromfaktoren (aus [Sam65])

Strompfad	Herzstromfaktor
linke Hand – linker Fuß	1,0
linke Hand – rechter Fuß	1,0
linke Hand – beide Füße	1,0
linke Hand – rechte Hand	0,4
rechte Hand – rechter Fuß	0,8
rechte Hand – linker Fuß	0,8
rechte Hand – beide Füße	0,8
beide Hände – linker Fuß	0,9
beide Hände – rechter Fuß	0,9
beide Hände – beide Füße	1,0
Rücken – linke Hand	0,7
Rücken – rechte Hand	0,3
Rücken – beide Hände	0,6
Brust – linke Hand	1,5
Brust – rechte Hand	1,3
Brust – beide Hände	1,1
Gesäß – linke Hand	0,8
Gesäß – rechte Hand	0,6
Gesäß – beide Hände	0,7
Hals – linke Hand	0,3
Hals – rechte Hand	0,2
Hals – beide Hände	0,1
linke Achselhöhle – beide Füße	1,0
linker Fuß – rechter Fuß <sup>a</sup>	0,04

<sup>a</sup>Dieser Wert wurde nicht von SAM genannt; Näheres siehe Haupttext



**Abbildung 5.8.:** Verteilung der Impedanzen im menschlichen Körper. Die Zahlen geben den prozentualen Anteil der Impedanz des Strompfades Hand-Fuß an. (aus IEC/TS 60479-1 ed4.0 nach [Fre34])

te haben auch ihren Eingang in IEC/TS 60479-1 gefunden, wo sie in diversen Tabellen zusammengefasst werden. Zwei dieser Tabellen sind hier in Tabelle 5.2 und 5.3 wiedergegeben. Darin sind die Werte von Gesamt-Körperimpedanzen für einen Strompfad Hand-Hand und große Kontaktflächen (in der Größenordnung von 10 000 mm<sup>2</sup>) angegeben.

An Hand der beiden Tabellen fällt unmittelbar auf, dass die Körperimpedanz eine spannungsabhängige Größe ist. Dies ist damit zu erklären, dass mit zunehmender Spannung die Haut leitfähiger und schließlich ganz durchschlagen wird, sodass bei hohen Spannungen nur noch der reine Körperinnenwiderstand wirksam ist. Beim Vergleich der Tabellen wird außerdem deutlich, dass die Gesamt-Körperimpedanz bei benässten Kontaktflächen und kleinen Spannungen deutlich geringer ist als im trockenen Zustand. Mit zunehmender Spannung gleichen sich die Werte im nassen Zustand denen im trockenen Zustand an. Auch dies lässt sich mit dem nachlassenden Einfluss der Hauptimpedanz bei steigenden Spannungen erklären.

Zusätzlich zur Spannungsabhängigkeit ist die Impedanz auch geometrisch bezie-

## 5. Medizinische Aspekte

**Tabelle 5.2.:** Gesamt-Körperimpedanzen für den Strompfad Hand–Hand, 50-Hz-Wechselspannung und große, trockene Kontaktflächen (aus IEC/TS 60479-1 ed4.0)

Spannung in V	Körperimpedanz in $\Omega$ , die nicht überschritten wird bei		
	5 % der Bevölkerung	50 % der Bev.	95 % der Bev.
25	1750	3250	6100
50	1375	2500	4600
75	1125	2000	3600
100	990	1725	3125
125	900	1550	2675
150	850	1400	2350
200	800	1275	2050
225	775	1225	1900
400	700	950	1275
500	625	850	1150
700	575	775	1050
1000	575	775	1050
Asympt. Wert	575	775	1050

**Tabelle 5.3.:** Gesamt-Körperimpedanzen für den Strompfad Hand–Hand, 50-Hz-Wechselspannung und große, mit Salzwasser befeuchtete Kontaktflächen (aus IEC/TS 60479-1 ed4.0)

Spannung in V	Körperimpedanz in $\Omega$ , die nicht überschritten wird bei		
	5 % der Bevölkerung	50 % der Bev.	95 % der Bev.
25	960	1300	1755
50	940	1275	1720
75	920	1250	1685
100	880	1225	1655
125	850	1200	1620
150	830	1180	1590
200	790	1135	1530
225	770	1115	1505
400	700	950	1275
500	625	850	1150
700	575	775	1050
1000	575	775	1050
Asympt. Wert	575	775	1050



hungsweise physiologisch ungleichmäßig über den menschlichen Körper verteilt, wie Abbildung 5.8 zeigt. Daraus lässt sich ablesen, dass die für diese Arbeit wichtige Impedanz von Fuß zu Fuß um ca. 20 % größer ist als die in den Tabellen 5.2 und 5.3 angegebenen Werte. Damit ergäbe sich für die Strecke Fuß–Fuß eine Impedanz von rund  $1200\,\Omega$ . Da aber nach  $U = Z \cdot I$  eine geringere angenommene Impedanz bei gleichem Strom zu einer geringeren Spannung führt, soll im Folgenden eine Impedanz von lediglich  $1\,\text{k}\Omega$  angenommen werden, um im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung einen gewissen Sicherheitspuffer einzubeziehen.

## 5.4. Sonstige Aspekte

### 5.4.1. Arten von Blitzunfällen

Grundsätzlich existieren im Zusammenhang mit Blitzunfällen mehrere unterschiedliche Energieübertragungsmechanismen, also Mechanismen, mit denen ein Mensch konkret in Kontakt mit Blitzströmen und -spannungen kommen kann. Da allerdings unterschiedliche Autoren wie beispielsweise ZACK et al. oder COOPER und ANDREWS zu unterschiedlichen Einteilungen dieser Mechanismen kommen, werden hier in Summe mehr Mechanismen vorgestellt, als typischerweise in einer einzelnen Literaturstelle zu finden sind [ACDM92], [ZSW04], [ZRW07].

#### Direkter Treffer („*Direct strike*“)

Der direkte Einschlag eines Blitzes in einen Menschen ist zweifellos die massivste Art eines Blitzunfalles und in der Regel mit schweren und schwersten Verletzungen verbunden. Dennoch enden entgegen der intuitiven Erwartung solche Unfälle nicht immer tödlich. (COOPER beispielsweise nennt Todesraten zwischen 10 % und 30 %, bezogen allerdings auf Blitzunfälle insgesamt [CAH07].) BERGER stellte hierzu bereits 1978 die Theorie auf, dass es bei einem direkten Blitzeinschlag in einen Menschen quasi sofort zu einem äußeren Gleitüberschlag über die Haut beziehungsweise die Kleidung des Opfers kommt [BBK78], wie folgende grobe Abschätzung zeigen soll: Ein Mensch sei 2 m groß und habe eine Körperimpedanz  $Z$  in Längsrichtung von  $1\,\text{k}\Omega$ . Dieser werde von einem Blitz mit einer maximalen Amplitude von  $I = 100\,\text{kA}$  am Kopf getroffen. Aus der maximalen Amplitude und der Anstiegszeit  $T_1 = 10\,\mu\text{s}$  (vgl. Kapitel 3.2.2) ergibt sich eine mittlere Stromsteilheit von

$$\overline{(di/dt)} = \frac{I}{T_1} = \frac{100\,\text{kA}}{10\,\mu\text{s}} = 10\,\text{kA}/\mu\text{s}. \quad (5.3)$$

Für die Überschlagsfeldstärke bei negativer Polarität  $E_{d100}$  können als Worst-Case-Abschätzung etwa  $1000\,\text{kV/m}$  angenommen werden [Küc05]. Die Betrachtung bei negativer Polarität wird deswegen herangezogen, weil zum einen rund 90 % aller Wolke-Erde-Blitze negative Polarität haben [HS09] und zum anderen die Überschlagsfeldstärken bei negativer Polarität höher sind als bei positiver [Küc05]. Dies bedeutet

## 5. Medizinische Aspekte

somit für die Überschlagsspannung  $U_{d100}$  über den Menschen:

$$U_{100} = l_{\text{Mensch}} \cdot E_{d100} = 2 \text{ m} \cdot 1000 \text{ kV/m} = 2 \text{ MV} \quad (5.4)$$

Damit diese Spannung über dem Menschen abfällt, bedarf es eines Stromes  $i$  von

$$i = \frac{U}{Z} = \frac{2 \text{ MV}}{1 \text{ k}\Omega} = 2 \text{ kA}. \quad (5.5)$$

Dazu ist anzumerken, dass diese Abschätzung sehr pessimistisch ist. In der Realität ist davon auszugehen, dass der Überschlag über einen Menschen weniger einem Durchschlag in Luft, sondern eher einer Gleitentladung gleicht. Eine Gleitentladung hat bei einer gegebenen Schlagweite jedoch einen deutlich geringeren Spannungsbedarf als ein Durchschlag.<sup>3</sup>

Die oben genannten 2 kA werden in diesem Beispiel gemäß (5.3) bereits innerhalb der ersten Mikrosekunde überschritten, wodurch nur ein vergleichsweise geringer Blitzstrom für eine sehr kurze Zeit durch den Menschen fließt. Nach dem Überschlag fließt der Großteil des Blitzstromes und damit auch ein Großteil der durch den Blitz transportierten Energie durch den äußeren Entladungskanal und somit nicht durch das Opfer hindurch, sondern außen daran vorbei. Dieser Effekt konnte später von KITAGAWA et al. auch experimentell nachgewiesen werden [KTIO85].

### Seitenüberschlag („*Side splash*“)

Hierbei schlägt der Blitz zwar in ein Objekt wie beispielsweise einen Baum ein, es kommt von dort aus jedoch zu seitlichen Überschlägen auf in der Nähe stehende Personen. Bei diesem Mechanismus sind prinzipiell ähnliche Verletzungen wie beim direkten Treffer die Folge, jedoch wird eine Teil der Blitzenergie bereits durch das eigentlich getroffene Objekt abgeleitet, sodass der Mensch nur noch mit einem Teil der Energie belastet wird.

### Schrittspannung („*Step voltage*“)

Wie bereits in Kapitel 4 beschrieben, handelt es sich hierbei um ein Potentialgefälle im Erdboden, das sich durch dort fließende Blitzströme ergibt.

### Kontakteffekt/Berührungsspannung („*Contact Voltage*“)

Hierbei berührt ein Mensch unmittelbar ein Objekt, das seinerseits vom Blitz getroffen wird. Ein typisches Beispiel hierfür ist eine berührte Ableitung eines Blitzschutzsystems (vgl. Kapitel 3.2.1) im Moment eines Blitzschlages.

---

<sup>3</sup>Zur näheren Erklärung der verschiedenen Durchschlagsmechanismen siehe die einschlägige Fachliteratur, beispielsweise [Küc05].

### Leitungsvermittelter Blitzunfall („*Telephone/wire-mediated lightning injury*“)

Dieser Mechanismus ist nur bedingt von der zuvor genannten Berührungsspannung zu trennen. Man versteht hierunter den Fall, dass ein Blitz in eine Leitung (wie der englische Begriff andeutet, beispielsweise eine Freiluft-Telefonleitung) einschlägt und dadurch auch über größere Entfernungen Personen schädigen kann, die gerade telefonieren oder sich anderweitig dicht an der betroffenen Leitung aufhalten. ANDREWS hat sich intensiv mit diesem Effekt beschäftigt [And93].

### Fangentladungen („*Upward streamer*“)

Hierbei geht von einem Menschen eine Fangentladung nach oben aus, die sich jedoch nicht mit dem Hauptblitzkanal verbindet. Daher ist dieser Mechanismus vergleichsweise energiearm. Er wurde längere Zeit in der Fachwelt diskutiert, inzwischen existiert jedoch mindestens ein Augenzeugenbericht über einen solchen Fall [Coo00].

Generell lässt sich in diesem Zusammenhang auch sagen, dass zwar durchaus viele Fallbeschreibungen konkreter Blitzunfälle (beispielsweise [SWR06], [MVM01], [CMS<sup>+</sup>94] u. a.) und auch verschiedene Statistiken zu Blitzunfällen existieren (z. B. [CAH07], [ACDM92], [Hol12]), jedoch handelt es sich hierbei lediglich um Einzelfall-schilderungen beziehungsweise Auswertungen, die auf einer lückenhaften Datenlage basieren. Daher wäre wünschenswert, wenn Blitzunfälle systematisch und flächendeckend erfasst werden würden, um eine solide Datenbasis für Blitzschutzuntersuchungen zu erhalten.

#### 5.4.2. Weitere gesundheitliche Folgen von Blitzunfällen

Zwar lassen sich zahlreiche Krankheitsbilder im Zusammenhang mit Blitzunfällen in letzter Konsequenz auf die weiter oben beschriebene Wärme- und Reiz-Wirkung des elektrischen Stromes zurückführen, jedoch wird aus medizinischer Sicht stärker nach den konkreten Symptomen differenziert – nicht zuletzt, um passende Therapien anwenden zu können. Daher sollen einige dieser Krankheitsbilder hier kurz und ohne Anspruch auf Vollständigkeit skizziert werden. Detailliertere Ausführungen hierzu sind beispielsweise bei COOPER und ANDREWS zu finden [ACDM92], [And93], [ZRW07].

#### Kardiorespiratorische Schädigungen

Kardiorespiratorische Schädigungen umfassen das Herz-Kreislauf- und das Atmungssystem. Neben den bereits in Kapitel 5.2 beschriebenen Auswirkungen wie einzelne Extrasystolen, Herzstillstand und Herzkammerflimmern können am Herzen ganz allgemein länger andauernde Herzrhythmusstörungen verschiedenster Ausprägungen (Arrhythmie) sowie eine dauerhaft verlangsamte (Bradykardie) und erhöhte Pulsfrequenz (Tachykardie) auftreten.

## 5. Medizinische Aspekte

Durch blitzverursachte Lähmungserscheinungen kann es außerdem zum Atemstillstand (Apnoe) kommen. Auch dieser bedarf – wie ein Herzstillstand oder Herzkammerflimmern – einer unmittelbaren Behandlung beispielsweise durch Herz-Lungen-Wiederbelebung (HLW, *CPR*). Andernfalls kann es durch die ausbleibende Sauerstoffversorgung des Körpers binnen kurzer Zeit zu dauerhaften Gehirnschädigungen oder zu einem sogenannten sekundären Herzstillstand kommen. Des Weiteren kann es in seltenen Fällen besonders starker Blitze zu Lungenquetschungen und Ähnlichem durch Druckwellen kommen [Coo95].

### Schädigungen der Augen und der Ohren

Bei der Schädigung der Augen sind häufig die Pupillen betroffen. Beispielsweise wurden von unterschiedlichen Weitungen der Pupillen (Anisokorie) oder von verkleinerten (Myotonie) oder vergrößerten Pupillen berichtet. Die am häufigsten auftretende Schädigung des Augeninneren durch Blitzeinwirkung ist der graue Star (Katarakt), also eine Trübung der Augenlinse. Auch Entzündungen einzelner Augenteile wie Regenbogenhaut (Iris, Iridozyklitis) oder Bindehaut (Konjunktivitis) sind möglich. In schweren Fällen können die Augen bis zur vollständigen Erblindung geschädigt werden.

Schädigungen der Ohren sind hauptsächlich Verletzungen, die durch die weiter oben bereits genannten Druckwellen eines nahen Blitzes ausgelöst werden, sogenannte Barotraumen. Am häufigsten treten dabei Risse des Trommelfells auf, kombiniert mit Schwerhörigkeit bis hin zur Taubheit. Weitere Folgen können Tinnitus und Schwindelgefühle (Vertigo) sein.

### Keraunoparalyse und neurologische Schäden

Bei Opfern von Blitzunfällen wurden auch Lähmungserscheinungen beobachtet, die sogenannte Keraunoparalyse, die üblicherweise nach kurzer Zeit wieder von selbst verschwinden. Neben diesen motorischen Störungen sind auch sensorische Störungen und Störungen der Reflexe möglich.

### Psychische Effekte

Nicht zu unterschätzen sind bei Blitzunfall-Opfern psychische Folgen wie beispielsweise Vergesslichkeit, Konzentrationsverlust oder Depressionen. Auch Angst vor hellem Licht (Photophobie) und posttraumatische Belastungsstörungen sind möglich.

## 5.5. Herleitung eines Schrittspannungs-Grenzwertes

Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, kann ein Blitzunfall zu zahlreichen gesundheitlichen Beeinträchtigungen und Schäden führen. Unmittelbar lebensbedrohlich sind dabei Schädigungen des Herzens. Wie in Kapitel 5.2 ausgeführt, stellt

## 5.5. Herleitung eines Schrittspannungs-Grenzwertes

dabei ein Herzstillstand ein geringeres Risiko dar, da sich das Herz in der Regel innerhalb kurzer Zeit selbstständig davon erholt. Das größere Risiko bildet in diesem Zusammenhang somit das Herzkammerflimmern. Entsprechend muss ein Spannungsgrenzwert so bemessen sein, dass das Auftreten von Herzkammerflimmern bei betroffenen Personen vermieden wird. Da sich diese Arbeit auf die Untersuchung von Schrittspannungen konzentriert, soll dementsprechend nur ein Grenzwert für Schrittspannungen gesucht werden – Grenzwerte beispielsweise für Berührungsspannungen würden davon deutlich abweichen. Schließlich soll der Grenzwert primär für einen Erstblitz bestimmt werden, da hier nach Tabelle 3.1 die höchsten Stromamplituden auftreten. Demnach wird im Folgenden stets von einem Impuls der Form 10/350  $\mu\text{s}$  (vgl. ebenfalls Tabelle 3.1) ausgegangen.

Zur Absicherung und Kontrolle wird der Grenzwert in den folgenden Kapiteln auf verschiedene Arten hergeleitet.

### 5.5.1. Bestimmung nach IEC 60479

Zur Vereinfachung soll der 10/350- $\mu\text{s}$ -Impuls für diese Bestimmungsmethode durch eine Kondensatorentladung angenähert werden. Gemäß IEC/TS 60479-2 ist für die Gesamtimpulsdauer  $t_i$  einer solchen Entladung die dreifache Zeitkonstante  $\tau$  anzusetzen:

$$t_i = 3 \cdot \tau \quad (5.6)$$

Nach DIN EN 62305-1 ist dabei für  $\tau$  ein Wert von 485  $\mu\text{s}$  anzunehmen. Somit ergibt sich  $t_i = 3 \cdot 485 \mu\text{s} \approx 1,5 \text{ ms}$ . Auf Grund dieser Zeitdauer kann aus *Figure 20* in IEC/TS 60479-2 (hier in Abbildung 3.3 wiedergegeben) ein entsprechender Körperstromwert abgelesen werden. Da ein Auftreten von Herzkammerflimmern sicher vermieden werden soll, ist in Abbildung 3.3 die grüne Kurve „C1“ zu verwenden. Dementsprechend ergibt sich für  $t_i = 1,5 \text{ ms}$  ein maximaler Körperstrom von 1 A (effektiv) als zulässig. Bei einer Kondensatorentladung darf nach IEC/TS 60479-2 für den Spitzenstrom  $I_p$  angenommen werden

$$I_p = \sqrt{6} \cdot I_{\text{rms}} \quad (5.7)$$

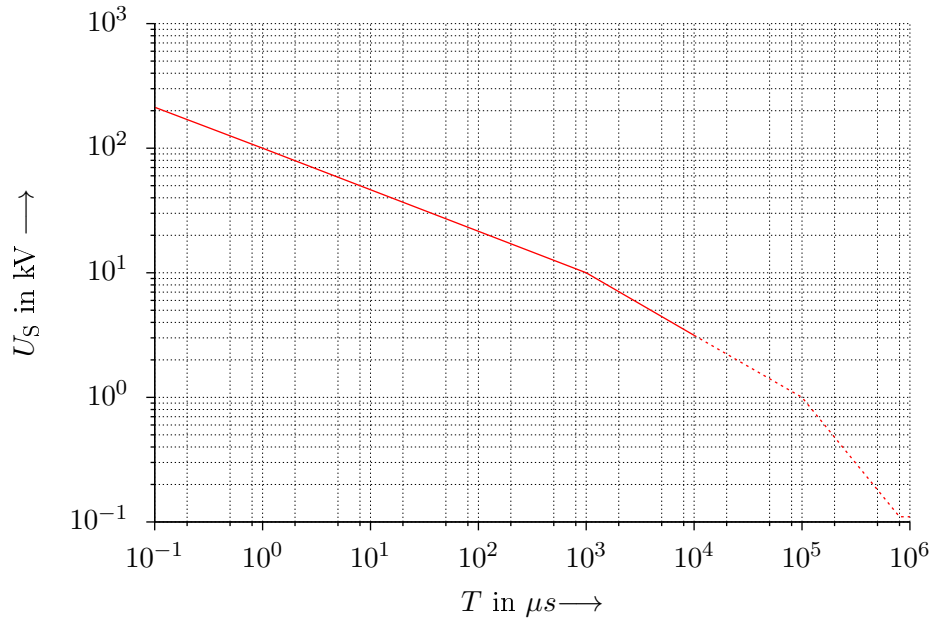
wobei  $I_{\text{rms}}$  der Effektivwert des Stromes ist. Somit ergibt sich ein zulässiger Stromspitzenwert von  $I_p = \sqrt{6} \cdot 1 \text{ A} \approx 2,45 \text{ A}$ . Da dieser Wert für eine Durchströmung von der linken Hand zu beiden Füßen gilt, muss er noch mit dem Herzstromfaktor für den Strompfad Fuß–Fuß umgerechnet werden (vgl. Tabelle 5.1):

$$I = \frac{I_{\text{ref}}}{k_H} = \frac{2,45 \text{ A}}{0,04} \approx 60 \text{ A} \quad (5.8)$$

Mit der Umrechnung des Stromes mittels des in Kapitel 5.3 festgelegten Körperwiderstandes von 1 k $\Omega$  ergibt sich somit eine maximal zulässige Schrittspannung von 60 kV.

### 5.5.2. Bestimmung nach Neuhaus

NEUHAUS stellt in seinem Kommentar zur damaligen VDE 0185 [Neu83] eine Kurve zulässiger Schritt- und Berührungsspannungen  $U_S$  in Abhängigkeit der Zeit  $T$  vor, die hier in Abbildung 5.9 wiedergegeben ist. Dabei soll bei einer Kondensatorentladung  $T = \tau$  gelten.



**Abbildung 5.9.:** Vorschlag für zulässige Schritt- und Berührungsspannungen in Abhängigkeit der Einwirkdauer nach NEUHAUS (aus [Neu83])

Entsprechend lässt sich für eine Halbwertszeit von  $\tau = 485 \mu s$  (siehe oben) ein Wert von  $U_S \approx 15 \text{ kV}$  ablesen. Es muss jedoch angemerkt werden, dass der Ursprung dieser Grafik beziehungsweise der zu Grunde liegenden Messwerte oder Überlegungen unklar bleibt (auch unter Einbeziehung von NEUHAUS' Konferenzbeitrag von 1971 [Neu71]). Daher kann dieser Wert nur als bedingt belastbar angesehen werden.

### 5.5.3. Bestimmung nach Dalziel

DALZIEL stellte in mehreren Veröffentlichungen seine „*electrocution equation*“ auf, die hier in Gleichung (5.9) wiedergegeben ist [DL68], [DL69]. Hierbei entspricht  $I_f$  der Schwelle für das Erzeugen von Kammerflimmern in Milliampere bei einer Körperdurchströmung Hand–Fuß.  $K$  ist ein vom Körpergewicht und Wahrscheinlichkeiten abhängiger Faktor gemäß Tabelle 5.4 und  $T$  entspricht der Stromflussdauer in Sekunden.

$$I_f = \frac{K}{\sqrt{T}} \quad (5.9)$$

**Tabelle 5.4.:** Werte für  $K$  in DALZIELS „*electrocution equation*“ (aus [Rei98])

Körpergew. in kg	Wahrsch. f. Kammerflimmern		
	50%	0,5%	MNF <sup>a</sup>
20	177	78	61
50	368	185	116
70	469	260	156

<sup>a</sup>MNF: *maximum nonfibrillating current*: Maximaler Strom, bei dem noch kein Kammerflimmern auftritt

Dabei ist zu beachten, dass DALZIEL für den Zeitparameter nur einen Gültigkeitsbereich von  $8,3\text{ ms} \leq T \leq 5\text{ s}$  angibt. Setzt man nun für  $K$  einen Wert von 116 (50 kg Körpergewicht und kein Auftreten von Kammerflimmern) sowie die kürzestmögliche Zeit  $T = 8,3\text{ ms}$  ein, erhält man für den maximal zulässigen Körperstrom:

$$I_f = \frac{116}{\sqrt{8,3\text{ ms}}} \approx 1,3\text{ A} \quad (5.10)$$

Wendet man auf dieses Ergebnis analog zu Abschnitt 5.5.1 noch einen Herzstromfaktor von 0,04 und einen Körperwiderstand von  $1\text{ k}\Omega$  an, erhält man eine maximal zulässige Schrittspannung von ca. 32 kV.

#### 5.5.4. Festlegung mittels Körperstromsimulation

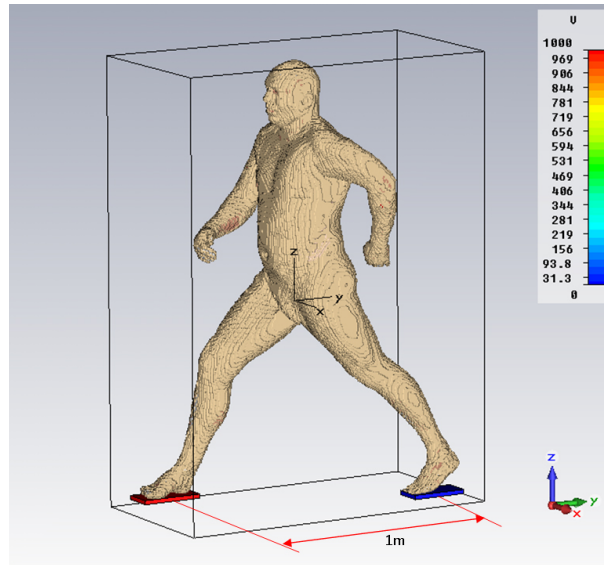
Als weiterer Lösungsansatz wurde ein Grenzwert mit Hilfe einer dreidimensionalen Computer-Simulation von Strömen im menschlichen Körper bestimmt. Während es sich bei den Bestimmungswegen der drei vorherigen Kapitel 5.5.1–5.5.3 lediglich um die Ergebnisse einer Literaturrecherche handelt, stellt der Weg über Körperstromsimulationen einen neuartigen Ansatz dar, der in dieser Form bislang noch nicht durchgeführt wurde und auf eigenen Überlegungen basiert. Dieser Weg der Bestimmung wurde ermöglicht durch eine enge Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet „Theorie Elektromagnetischer Felder“ (TEMF) der TU Darmstadt, namentlich durch GAO, welcher sämtliche hier gezeigten Körperstromsimulationen durchführte [Gao12a].

Als Grundlage für diese Simulationen diente das sogenannte *HUGO*-Modell, welches auf dem „*Visible Human Project*“ basiert. Hierbei wurde die Leiche eines Mannes in feiner räumlicher Auflösung digitalisiert, sodass sie in verschiedenen Auflösungsstufen (Würfel mit einer Kantenlänge zwischen 1 mm und 8 mm) vorliegt [VHP12]. Dabei sind in diesen Datensätzen die diskreten Kuben (Voxel) bereits einzelnen Gewebetypen wie Knochen, Muskeln, innere Organe usw. zugeordnet. Das *HUGO*-Modell ergänzt diese zunächst rein medizinisch-geometrischen Daten um elektrotechnische Kenngrößen für jeden Gewebetyp, sodass elektrische Simulationen am kompletten

## 5. Medizinische Aspekte

Körper oder auch an einzelnen Organen möglich sind [Ack98]. In dieser Funktion ist das *HUGO*-Modell allgemein wissenschaftlich anerkannt und wurde bisher hauptsächlich für die Simulation elektromagnetischer Hochfrequenzfelder verwendet.

Das *HUGO*-Modell wurde zunächst von GAO so modifiziert, dass es sich anatomisch korrekt in beliebige Körperpositionen bringen lässt (im Originalzustand ist nur eine liegende Körperhaltung mit vor dem Bauch gekreuzten Händen verfügbar) und wurde nach Kenntnisstand des Autors zum ersten Mal zur Simulation von Schrittspannungen verwendet. Dazu wurde das Modell in eine Schrittposition mit einer Schrittweite von 1 m gebracht und an die beiden Fußsohlen eine Spannung von 1 kV angelegt. (Siehe Abbildung 5.10.)



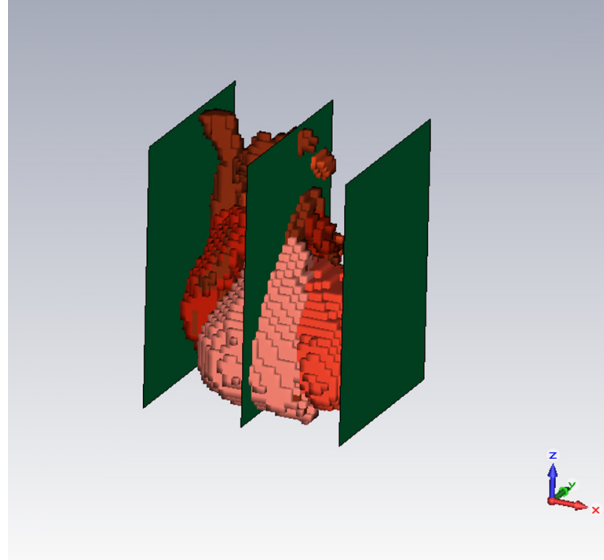
**Abbildung 5.10.:** Modellierung der Schrittspannungssimulation mittels *HUGO* durch GAO (aus [Gao10b])

Da GAO in seinen Untersuchungen nachweisen konnte, dass bei einem angelegten  $10/350\text{-}\mu\text{s}$ -Impuls die Simulationsergebnisse zu jedem Zeitpunkt identisch mit denjenigen einer stationären Simulation sind, wenn deren Ergebnisse auf den Momentanwert eines Spannungsimpulses der Form  $10/350\text{ }\mu\text{s}$  skaliert werden, konnten alle Körperstromsimulationen rein stationär durchgeführt werden. Da das *HUGO*-Modell auch keine Nichtlinearitäten aufweist, können die Ergebnisse der Simulation auch frei mit der angelegten Spannung skaliert werden. Selbst bei einem Folgeblitzimpuls der Form  $0,25/100\text{ }\mu\text{s}$  sind die Abweichungen zwischen skaliert stationärer und transienter Simulation vernachlässigbar gering [Gao12a], [Gao12b]. Außerdem wurde mit Hilfe von Voruntersuchungen sichergestellt, dass es keinen nennenswerten Unterschied macht, ob sich das *HUGO*-Modell in einer Schrittposition mit 1 m Schrittweite oder in einer stehenden Position befindet, bei der die Beine seitwärts nach rechts und links mit einer Gesamtspannweite von ebenfalls 1 m abgespreizt sind.



### 5.5. Herleitung eines Schrittspannungs-Grenzwertes

Zur näheren Auswertung der Simulationen wurden durch das Herz insgesamt drei Schnittflächen gelegt (dunkelgrün in Abbildung 5.11 dargestellt), über die die sich einstellende Stromdichte in der Simulation integriert wurde, um den Gesamtstrom durch das Herz zu erhalten.



**Abbildung 5.11.:** Schnittflächen (grün) im *HUGO*-Modell zur Auswertung der Herzströme (aus [Gao10b])

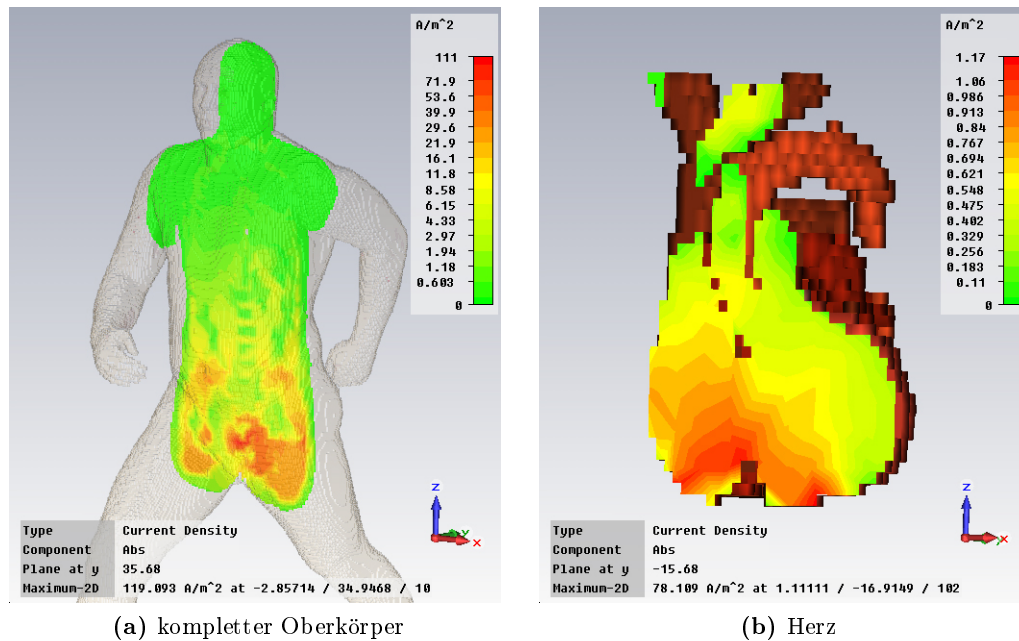
Wie sich bereits an Hand von Abbildung 5.12 zeigt, trifft die Vermutung zu, dass sich bei einer Durchströmung des menschlichen Körpers von Fuß zu Fuß der Strom im Torso hauptsächlich auf den Unterleib konzentriert. Als Ergebnis für den Strom durch das Herz wurde ein Wert von ca. 7,5 mA bei einer angelegten Spannung an den Füßen von 1 kV gewonnen.

Um diesen Wert interpretieren zu können, sei zunächst auf die Arbeit von YOUNOSSI verwiesen [YRHA73]. Hierbei wurden an isolierten Meerschweinchenherzen die Stromstärken in Abhängigkeit von der Impulsdauer bestimmt, die zu Herzkammerflimmern führte. Das Ergebnis dieser Experimente ist in Abbildung 5.13 wiedergegeben.

Bei den Experimenten von YOUNOSSI kamen Elektroden unterschiedlicher Größe zum Einsatz. Unter der Annahme, dass die Durchströmung des Herzens im Körper eher denen einer großen Elektrode („*large electrode*“ – bei YOUNOSSI ca.  $0,7 \text{ mm}^2$ ) entspricht, lässt sich aus dem Diagramm eine Maximalstromstärke von 50 mA ablesen.

Da das Herz eines Meerschweinchens jedoch deutlich kleiner ist, muss dieses Ergebnis noch mit der Körpermasse skaliert werden. Hierzu wird die Arbeit von FERRIS et al. herangezogen: Dort ist die Stromstärke – allerdings als Körpergesamtstrom – angegeben, die bei unterschiedlichen Tierarten notwendig ist, um Herzkammerflimmern

## 5. Medizinische Aspekte



**Abbildung 5.12.:** Ergebnisse der *HUGO*-Schrittspannungssimulation durch GAO, dargestellt sind Stromdichten. (aus [Gao10b])

hervorzurufen. (Die Grafik ist hier in Abbildung 5.14 wiedergegeben.)

Aus Abbildung 5.14 lässt sich ablesen, dass die Stromstärke bei 50 kg schweren<sup>4</sup> Schafen („*Sheep*“) um mindestens den Faktor 4 ( $\sim 160\text{ mA}$  vs.  $\sim 40\text{ mA}$ ) über derjenigen von Meerschweinchen („*Guinea pigs*“) liegt. Demzufolge darf der Herzstrom beim Menschen mindestens  $4 \cdot 50\text{ mA} = 200\text{ mA}$  betragen, ohne Herzkammerflimmern auszulösen. Um diesen Wert zu erreichen, muss an den Fußsohlen demnach eine Spannung von

$$U_S = \frac{200\text{ mA}}{7,5\text{ mA}} 1\text{ kV} \approx 26,6\text{ kV} \quad (5.11)$$

anliegen.

Zum Abgleich des *HUGO*-Modells mit der Literatur wurde außerdem untersucht, welcher Strom in die Füße hinein- und herausfließt, wenn eine Spannung von 1 kV an diese angelegt wird. Als Ergebnis wurde ca. 0,8–0,9 A festgestellt, woraus sich für den Strompfad Fuß–Fuß ein Körperwiderstand von etwa 1,1–1,2 k $\Omega$  ergibt. Dies entspricht sehr gut den in Kapitel 5.3 vorgestellten Literaturwerten, sodass die *HUGO*-Simulationen als plausibel angesehen werden können.

Zur weiteren Verifikation der *HUGO*-Simulationen, auch mit den Messwerten von SAM ([Sam65]), wurde eine weitere Simulation durchgeführt: Es wurde der Strompfad linke Hand – linker Fuß mit einer Wechselspannung von 220 V, 50 Hz simuliert.

<sup>4</sup>dieses Gewicht soll herangezogen werden, um auch eher kleine und schlanke Personen zu berücksichtigen

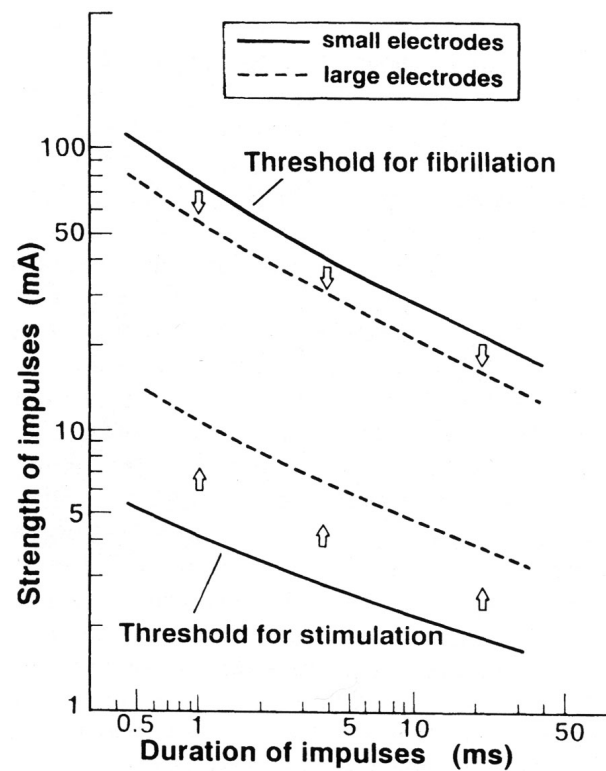


Abbildung 5.13.: Stromstärken-Schwellenwerte in Abhängigkeit der Impulsdauer für Stimulation („*stimulation*“) und Kammerflimmern („*fibrillation*“) an isolierten Meerschweinchenherzen bei Rechteckimpulsen (aus [Rei98] nach [YRHA73])

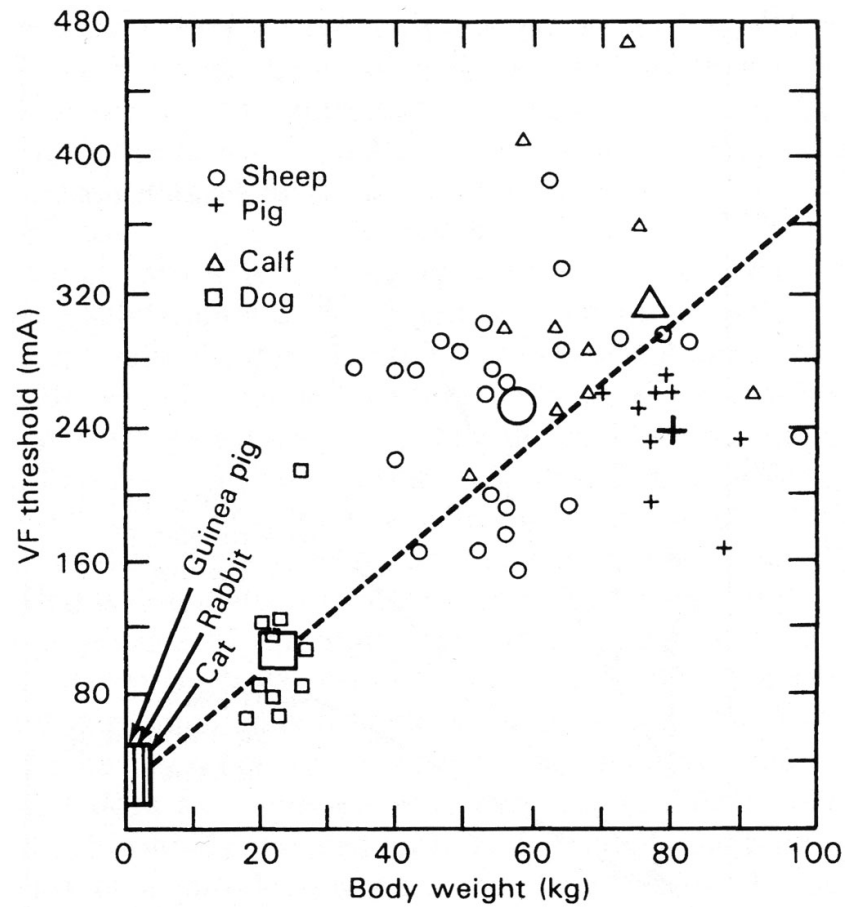
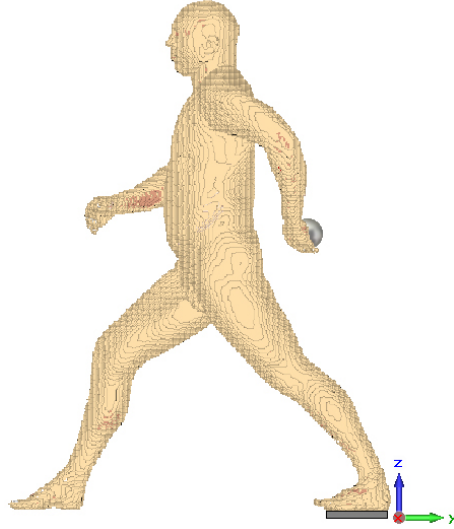


Abbildung 5.14.: Körperstromstärke für Kammerflimmern in Abhängigkeit des Gewichts verschiedener Versuchstiere (aus [Rei98] nach [FKSW36])

### 5.5. Herleitung eines Schrittspannungs-Grenzwertes

Abbildung 5.15 zeigt die Anordnung. Unter dem linken Fuß ist die eine der beiden Kontaktierungen zu erkennen, die Kugel in der linken Hand stellt die andere Kontaktierung dar und bildet eine vergleichsweise genaue Nachbildung von SAMs Kontaktierung.

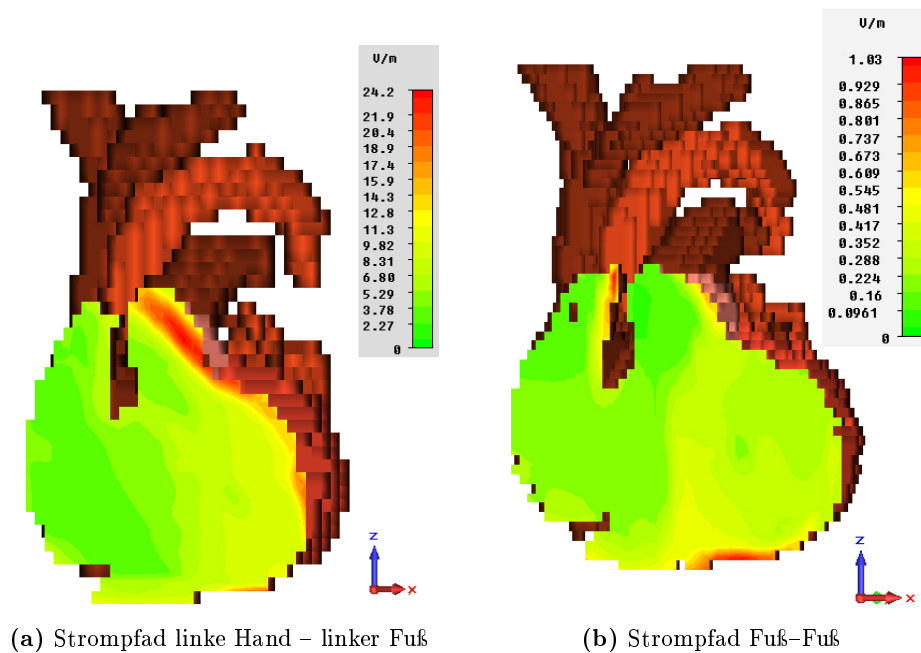


**Abbildung 5.15.:** *HUGO*-Modell für die Simulation des Strompfades linke Hand – linker Fuß (aus [Gao10a])

Zum Vergleich wurde mit derselben Spannungsform auch der Strompfad Fuß–Fuß nochmals simuliert. Die jeweils entstehenden elektrischen Feldstärken im Herz sind in Abbildung 5.16 dargestellt.

Betrachtet man zunächst das Ergebnis für den Strompfad Hand–Fuß, ist eine grobe Dreiteilung der elektrischen Felder im Herzen zu erkennen: Im rechten Vorhof und der rechten Herzkammer (im Bild links zu sehen) herrscht eine Feldstärke von  $3\text{--}5\text{ V m}^{-1}$ , in der linken Herzkammer (rechts im Bild)  $10\text{--}12\text{ V m}^{-1}$  und im linken Vorhof lokal  $20\text{--}25\text{ V m}^{-1}$ . Dies entspricht relativ gut den  $12,9\text{ V m}^{-1}$ , die SAM für diesen Strompfad gemessen hat. Dies liefert eine weitere Bestätigung für die Korrektheit des *HUGO*-Modells.

Vergleicht man nun das Ergebnis für den Strompfad Hand–Fuß mit demjenigen für den Strompfad Fuß–Fuß, erkennt man für die absoluten Feldstärkespitzenwerte ein Verhältnis von  $1,03\text{ V m}^{-1}/24,2\text{ V m}^{-1} \approx 0,043$ . Ignoriert man bei der Betrachtung die räumlich eng begrenzten Zonen besonders hoher Feldstärken und nimmt für den Fall Hand–Fuß eine maximale Feldstärke von  $20\text{ V m}^{-1}$  sowie  $0,5\text{ V m}^{-1}$  für den Strompfad Fuß–Fuß, ergibt sich ein Herzstromfaktor von  $0,5\text{ V m}^{-1}/20\text{ V m}^{-1} = 0,025$ . Bei beiden Betrachtungsweisen ist eine gute Übereinstimmung mit dem Herzstromfaktor von 0,04, welcher in IEC/TS 60479-1 angegeben wird, zu erkennen. Somit lässt sich dieser Herzstromfaktor (vgl. Abschnitt 5.2.3) zumindest größenordnungsmäßig mit dem *HUGO*-Modell verifizieren.



**Abbildung 5.16.:** Ergebnisse des *HUGO*-Modells bei 220 V, 50 Hz als elektrische Feldstärken im Herz (aus [Gao10a])

### 5.5.5. Zusammenfassung und Bewertung

Abschließend sollen die in den vorherigen Abschnitten 5.5.1 bis 5.5.4 ermittelten Ergebnisse nochmals zusammengefasst und bewertet werden. Dies ist in Tabelle 5.5 geschehen.

**Tabelle 5.5.:** Zusammenfassung der unterschiedlichen Schrittspannungsgrenzwerte

	$U_S$ in kV
nach IEC 60479	60
nach NEUHAUS	15
nach DALZIEL	32
Körperstromsimulation ( <i>HUGO</i> )	26,6

Von diesen Ergebnissen stellen die 15 kV nach NEUHAUS den kleinsten Wert dar. Da, wie bereits weiter oben geschrieben, sich die Angaben von NEUHAUS nicht im Detail verifizieren lassen, soll dieser Wert im Weiteren nicht als belastbar angesehen werden und wird daher nicht als Schrittspannungs-Grenzwert herangezogen.

Der nächstgrößere Wert sind die 26,6 kV, die sich aus der *HUGO*-Simulation ergeben. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der Wert in dieser Form den Anschein einer

### 5.5. Herleitung eines Schrittspannungs-Grenzwertes

Genauigkeit erweckt, die so nicht gegeben ist: Auch das *HUGO*-Modell ist mit Ungenauigkeiten bei der Digitalisierung etc. behaftet, die sich jedoch mangels geeigneter Vergleichsmodelle nicht quantifizieren lassen. Zudem unterliegt, wie bereits in der Einleitung geschrieben, die menschliche Physis einer gewissen statistischen Streuung, die im *HUGO*-Modell ebenfalls nicht berücksichtigt ist. Daher spricht nichts dagegen, diesen Wert zur besseren Handhabbarkeit und Darstellbarkeit im Folgenden zu runden. Ein Aufrunden, beispielsweise auf 30 kV, verbietet sich dabei von selbst, da der Grenzwert möglichst absolute Sicherheit bieten soll, was bei höheren Spannungen nicht mehr gegeben wäre. Der Wert wird daher auf 25 kV abgerundet.

Die nach DALZIEL ermittelten 32 kV liegen in derselben Größenordnung wie der Wert der *HUGO*-Simulation und können als Hinweis darauf gesehen werden, dass die Körperstromsimulationen grundsätzlich richtige Ergebnisse geliefert haben. Allerdings ist der Wert auch höher als das Ergebnis der *HUGO*-Simulation, sodass er mit der vorgenannten Begründung einer möglichst sicheren Auslegung nicht verwendet werden sollte.

Der höchste aller ermittelten Werte ist derjenige nach IEC 60479 mit 60 kV. Auch dieser Wert kommt aus der zuvor genannten Sicherheitsüberlegung nicht in Frage. Da jedoch Normen als „anerkannter Stand der Technik“ gelten, gibt die Wahl eines niedrigeren – und damit unkritischeren – Grenzwertes auch rechtliche Sicherheit.

Zusammenfassend lässt sich somit sagen, dass die Wahl des Ergebnisses der *HUGO*-Simulation am sinnvollsten erscheint. Daher soll für diese Arbeit dieser – wie zuvor begründet auf 25 kV abgerundete – Wert als Grenzwert für Schrittspannungen bei einer Impulsform von 10/350  $\mu$ s angenommen werden.





## 6. Voruntersuchungen und Plausibilitätskontrolle des Simulationsmodells

**Zusammenfassung:** *In diesem Kapitel wird zunächst das verwendete Simulationsmodell allgemein vorgestellt, wozu auch die angenommenen Rahmenbedingungen gehören. Insbesondere wird dazu auch auf den Effekt der Bodenionisierung eingegangen und dessen Umsetzung in der Simulation gezeigt. Anschließend wird das Simulationsmodell mit verschiedenen Methoden validiert und die Entscheidung, ausschließlich stationäre Erdungssimulationen zu verwenden, begründet.*

### 6.1. Allgemeines zum Simulationsmodell

#### 6.1.1. Verwendete Simulationssoftware

Zu Beginn des Forschungsprojektes wurden zunächst die am Markt erhältlichen Simulationssoftware-Pakete für elektrische Feldsimulationen gesichtet, unter anderem *AnSYS*, *COMSOL Multiphysics* und *CST EM Studio*. Nach einer Testphase mehrerer Kandidaten und einem Auswahlverfahren fiel die Wahl schließlich auf die Software *COMSOL Multiphysics*, da diese Software unter anderem bereits zum damaligen Zeitpunkt elektrische Strömungsfelder mit nichtlinearen Materialien (zur Berücksichtigung von Bodenionisation, vgl. Kapitel 6.1.3) beherrschte<sup>1</sup> und gleichzeitig eine gute Benutzbarkeit bot. Dabei kam neben dem Basispaket von *COMSOL* auch das Zusatzpaket „*AC/DC Module*“ zum Einsatz, da dieses einige für elektrische Feldsimulationen hilfreiche Simulationsmodi komfortabel vordefiniert.

Als Solver kam dabei derjenige für stationäre Strömungsfelder zum Einsatz, das heißt, es wurden Gleichstrom-Simulationen durchgeführt. Dies erscheint bei einem transienten Vorgang wie einem Blitzeinschlag zunächst widersinnig, erlaubt aber einen deutlich verringerten Aufwand an Rechenzeit für jede einzelne Simulation. Dass dieser Ansatz ausreichend genaue Ergebnisse liefert, wird in Kapitel 6.2.1 gezeigt.

Der Blitzstrom wurde bei jeder Simulation über eine Schnittfläche – in der Regel die Nachbildung einer Erdungsfahne – über die Randbedingung („*boundary condition*“) „*Port*“ als fest vorgegebener Gesamtstrom in die Erdungsanlage eingespeist.

---

<sup>1</sup> *CST EM Studio* wird voraussichtlich in der Version 2013 erstmals ebenfalls nichtlineare Materialien in elektrischen Strömungsfeldern berücksichtigen können.

Sofern nicht anders angegeben, wurde jede Erdungskonfiguration stets mit drei in Tabelle 3.1 benannten Maximalströmen 100 kA, 150 kA und 200 kA simuliert.

### 6.1.2. Geometrische Abmessungen

Ein elektrisches Strömungsfeld, welches sich im Erdboden um eine Erderanlage – gleich welcher Form – ausbreitet, hat das Bestreben, die elektrische Stromdichte  $J$  zu vergleichmäßigen. Dies führt dazu, dass – einen ideal homogen leitfähigen Boden vorausgesetzt – sich die Ebenen gleicher elektrischer Stromdichte mit zunehmender Entfernung von der Erderanlage einer Halbkugelschale annähern. Entsprechend (3.1) gilt dies somit auch für Isopotentialflächen, die sich ebenfalls zu Halbkugelschalen ausbilden. Der Mittelpunkt der Halbkugelschale liegt dabei auf der Erdoberfläche und in der Mitte der Erdungsanlage. Dies bedeutet für  $r \gg 0$

$$\vec{J}(r, \varphi, \theta) \approx \vec{J}(r) \quad (6.1)$$

Dies bedeutet außerdem auch, dass mit zunehmender Entfernung vom Mittelpunkt die Radialkomponenten von  $\vec{J}$  zu Null werden:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} J_\varphi(r) = 0 \quad (6.2)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} J_\theta(r) = 0 \quad (6.3)$$

Daraus ergibt sich, dass der ideale Berechnungsraum für Erdersimulationen eine Halbkugel ist, weswegen entsprechend auch für alle hier vorgestellten Erdersimulationen eine Halbkugel als grundlegender Simulationsraum gewählt wurde. Dabei wurden sämtlichen gekrümmten Flächen der Halbkugel die Randbedingung „*Ground*“ zugewiesen, was ein fest definiertes Potential  $\Phi = 0 \text{ V}$  und ausschließlich normale Feldkomponenten impliziert und somit den ausschließlich radialen Feldkomponenten (vgl. (6.2) und (6.3)) auf dem Inneren der Halbkugelschale entspricht. Dies stellt einen Ersatz für eine ideale, unendlich weit entfernte Erde dar.

Die Schnittfläche der Halbkugel dagegen repräsentiert die Erdoberfläche und wurde mit der Randbedingung „*Electric insulation*“ versehen, da kein Strom aus dem Boden in die Luft austreten soll. Entsprechend impliziert diese Randbedingung ausschließlich tangentielle Feldkomponenten.

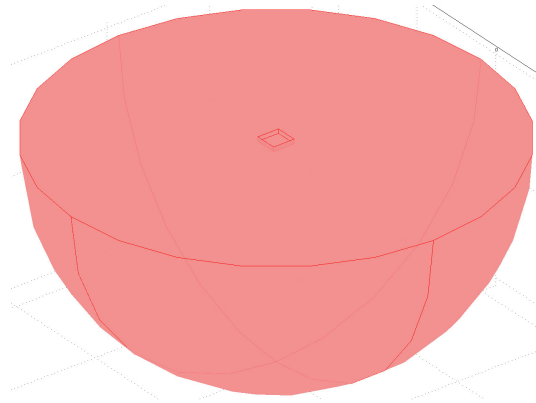
Um die Untersuchungen zu systematisieren, wurden vier unterschiedlich große Gebäude definiert, an denen, beziehungsweise um diese herum, die jeweils zu untersuchenden Erderanlagen modelliert wurden. Die Gebäudegrößen sind dabei konkret:

1. Gebäude  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ : Beispiel für sehr kleine Gebäude, beispielsweise Kioske oder Schutzhäuschen.
2. Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ : ähnlich dem vorherigen Gebäude, jedoch mit einem rechteckigen statt quadratischen Grundriss.

3. Gebäude  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ : Beispiel für ein Einfamilienhaus.
4. Gebäude  $10\text{ m} \times 50\text{ m}$ : Beispiel für eine kleine Lagerhalle, einen Stall o. ä.

Für alle vier Gebäudegrößen wurde zudem jeweils ein 2 m tiefer Keller angenommen. Dies stellt zwar bei den beiden kleineren Gebäudegrößen einen in der Praxis sehr untypischen Fall dar, jedoch wurde dies bewusst so gewählt, um die Variationen von Fall zu Fall nicht zu groß werden zu lassen und so die Ergebnisse besser miteinander vergleichen zu können.

Da Neubauten heutzutage üblicherweise mit Feuchtigkeits- und/oder Wärmeisolierungen an den Kellerwänden und teilweise sogar unter der Bodenplatte ausgeführt werden, welche gleichzeitig gute elektrische Isolatoren sind [Deh07], haben die Kellerwände im Allgemeinen keinen oder nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Verteilung des Blitzstromes im Boden. (Wie sich die Ergebnisse verändern können, falls Kellerwände nicht elektrisch isoliert sind, ist in Kapitel 6.2.2 beschrieben.) Entsprechend wurden die Gebäude selbst nicht modelliert. Dies geschah durch Ausschneiden eines Volumens in der Größe des jeweiligen Gebäudegrundrisses und 2 m Tiefe in der Mitte des Simulationsgebietes. Auch den dadurch entstandenen Schnittflächen wurde die Randbedingung „*Electric insulation*“ zugewiesen. Abbildung 6.1 zeigt den Simulationsraum mit einem Gebäudeausschnitt der Größe  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ .



**Abbildung 6.1.:** Simulationsgebiet der Erdungssimulationen in *COMSOL* mit Außenradius  $r_a = 100\text{ m}$ . In der Mitte ist der Ausschnitt für ein Gebäude  $10\text{ m} \times 10\text{ m} \times 2\text{ m}$  zu erkennen.

Um einerseits den möglichen Einfluss von Randeffekten klein zu halten, aber andererseits das Simulationsgebiet und damit einhergehend den Rechenaufwand nicht zu stark ansteigen zu lassen, wurde in allen Simulationen der Außenradius  $r_a = 100\text{ m}$  gewählt. Dabei beträgt zwar bei sehr großen Erdungsanlagen (beispielsweise ein Gebäude von  $10\text{ m} \times 50\text{ m}$  mit vier umlaufenden Ringerdern, vgl. Kapitel 7.1.2) der Abstand vom äußersten aktiven Erdungsteil zum Rand nur noch ca. 65 m und ist damit nicht mehr groß gegenüber der Ausdehnung der Anlage. Wie jedoch in Kapi-

tel 6.2.3 gezeigt wird, wäre selbst bei noch kleineren Abständen der Einfluss auf die berechneten Schrittspannungen vernachlässigbar.

### 6.1.3. Bodeneigenschaften und Bodenionisation

Die meisten Erdungsanlagen wurden zudem mit zwei unterschiedlichen Bodentypen simuliert, die im Folgenden als „linearer Boden“ und „nichtlinearer Boden“ bezeichnet werden sollen.

#### Linearer Boden

In den Simulationen mit sogenanntem „linearen Boden“ wurde der gesamte Erdboden im Simulationsraum auf eine Leitfähigkeit  $\sigma = 0,001 \text{ S/m}$ , entsprechend einem spezifischen Widerstand  $\rho = 1000 \Omega\text{m}$ , gesetzt. Wie im Vergleich mit Abbildung 6.2 zu sehen ist, entspricht dies einem eher schlecht leitfähigen Boden und stellt somit sozusagen einen „*Bad Case*“ dar [Deh07], [AGS11].

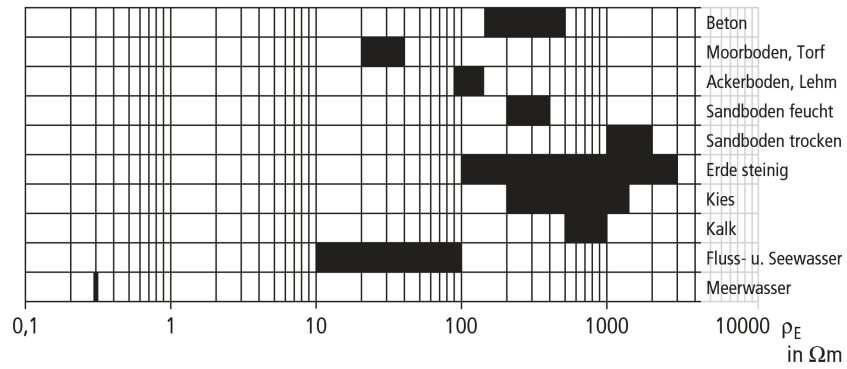
Zwar sind, beispielsweise in trockenem Fels, durchaus noch deutlich höhere spezifische Widerstände denkbar, jedoch wäre eine solche Worst-Case-Annahme nur bedingt praktikabel: Einerseits fällt es schwer, eine wirklich schlechteste Bodenleitfähigkeit zu beziffern, andererseits wird die Errichtung einer Erdungsanlage in oder auf Fels in der Praxis schon aus Gründen der Ausführbarkeit meist eine individuelle Betrachtung des Einzelfalls erfordern. Darüber hinaus gibt beispielsweise der CCIR *World Atlas of Ground Conductivities* [ITU07] für Deutschland im großräumigen Maßstab Bodenleitfähigkeiten zwischen  $1 \text{ mS/m}$  und  $10 \text{ mS/m}$  (entsprechend  $100\text{--}1000 \Omega\text{m}$ ) an.

#### Nichtlinearer Boden und Bodenionisation

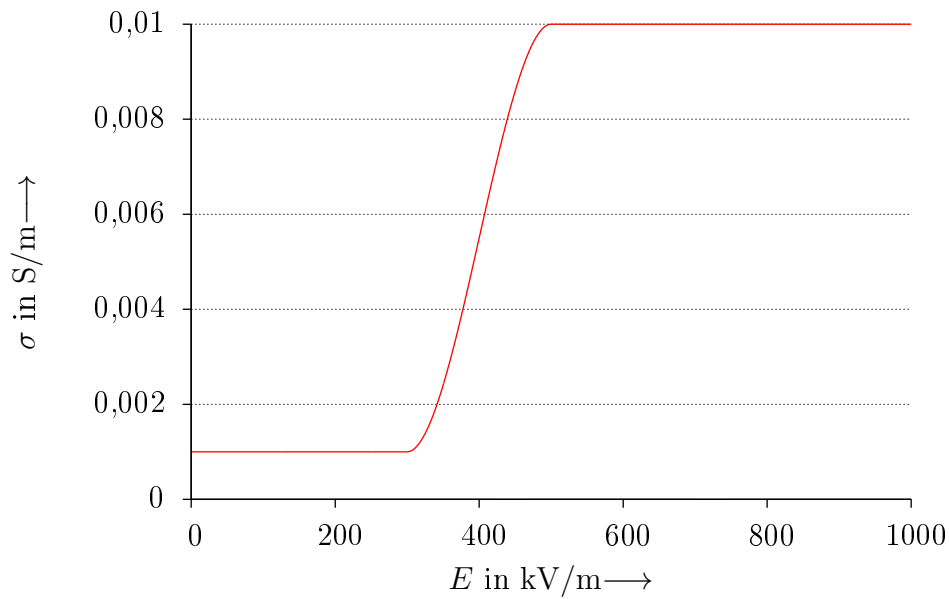
Auch der in Kapitel 3.1.4 beschriebene Effekt der Bodenionisation sollte optional in den Simulationen nachgebildet werden.

Wie der Überblick von ASIMAKOPOULOU über frühere Messreihen [AGS11] zeigt, wurde in der Vergangenheit ein großes Spektrum an Durchschlagfeldstärken und weiteren Bodenparametern ermittelt. Um den Effekt der Bodenionisation in den Simulationen nachzubilden, ist es aus praktischen Gründen zweckmäßig, sich auf eine einzige Nachbildung festzulegen. Daher wurde eine Funktion definiert, welche die Bodenleitfähigkeit in Abhängigkeit der anliegenden elektrischen Feldstärke variiert. Dabei beträgt die Leitfähigkeit für schwache E-Felder ( $E < 300 \text{ kV/m}$ ) wie im linearen Fall  $0,001 \text{ S/m}$ . Für  $E > 500 \text{ kV/m}$  beträgt die Bodenleitfähigkeit  $0,01 \text{ S/m}$ . Dazwischen steigt die Funktion durch kubische Interpolation monoton an. Abbildung 6.3 gibt einen Graph dieser Funktion wieder. Die Wahl der kritischen Feldstärke und der Leitfähigkeit im ionisierten Zustand orientiert sich dabei insbesondere an den Messungen von BERGER, LEADON und LIU et. al. [Ber46], [LFMD83], [LTGT03].

## 6.1. Allgemeines zum Simulationsmodell



**Abbildung 6.2.:** Spezifische Widerstände verschiedener Böden (aus [Deh07])



**Abbildung 6.3.:** Funktion der Bodenleitfähigkeit  $\sigma$  in Abhängigkeit vom anliegenden elektrischen Feld  $E$  zur Nachbildung des Effektes der Bodenionisation in der Simulation

### 6.1.4. Auswertung der Simulationen

In Voruntersuchungen hatte sich gezeigt, dass bei Gebäuden mit rechteckigem Grundriss die höchsten Schrittspannungen stets entlang einer Linie auftreten, die von einer beliebigen Gebäudeecke aus im  $45^\circ$ -Winkel zu den Gebäudewänden ausgeht, sofern sich aktive Erderteile unmittelbar an den Gebäudeecken befinden. (Eine nähere Begründung dieses Sachverhalts ist in Kapitel 6.2.4 zu finden.) Daher beziehen sich sämtliche in den folgenden Kapiteln dargestellte Ergebnisse, sofern nicht anders angegeben, auf eine Betrachtung entlang einer solchen  $45^\circ$ -Achse. Die Angabe des Ortes erfolgt dabei, sofern nicht ebenfalls anders angegeben, in Form der Entfernung  $r$  von der Gebäudeecke aus. Die Entfernung  $r$  bezieht sich dabei stets auf denjenigen Fuß der Person, der dem Gebäude näher ist, wie in Abbildung 3.1 dargestellt ist.

Zur Auswertung wurde dabei, da *COMSOL* selbst keine Schrittspannung berechnen kann, zunächst das elektrische Potential auf der Erdoberfläche entlang einer  $45^\circ$ -Achse ausgelesen. Aus den so erhaltenen Werten wurden mit Hilfe eines selbst geschriebenen awk-Skriptes<sup>2</sup> die (prospektiven) Schrittspannungen berechnet. Das Skript ist dabei so angelegt, dass für die Berechnung per Aufrufparameter beliebige Schrittweiten angegeben werden können. Alle hier vorgestellten Ergebnisse sind jedoch mit einer Schrittweite von 1 m entsprechend DIN EN 50522 (VDE 0101-2) berechnet.

Bei einigen Erdungskonfigurationen ist das Oberflächenpotential jedoch nicht – wie beispielsweise einem einfachen Stab- oder Halbkugelerder – streng monoton fallend, sondern weist lokale Maxima auf, wie in Abbildung 6.4a für das Beispiel einer Vier-Ringerder-Anlage zu sehen ist.

Die Berechnung der Schrittspannung aus dem Oberflächenpotential nach (3.2) führt dabei rein mathematisch auch zu negativen Schrittspannungen. Dies ist jedoch in der Darstellung nicht intuitiv verständlich, zudem hat aus medizinischer Sicht die Polarität der Schrittspannung keinen Einfluss. Daher enthält das Berechnungsskript zusätzlich eine Betragsbildung. Entsprechend werden alle Schrittspannungen in dieser Arbeit auch in Betragsform angegeben.

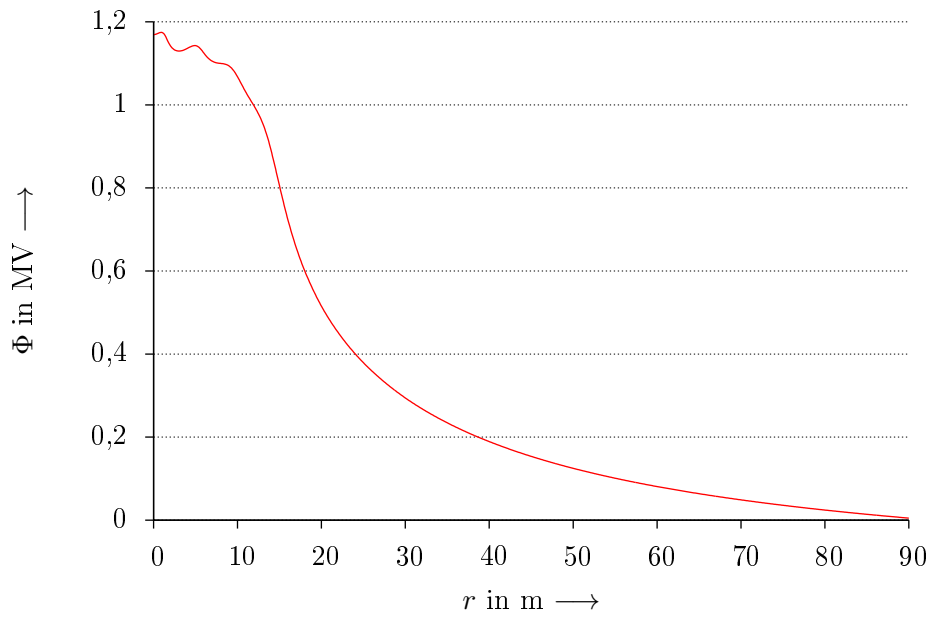
Der Quellcode des Skriptes ist in Anhang A zu finden.

Prinzipbedingt kann auf diese Weise jedoch nur die leerlaufende Schrittspannung  $U_{\text{VS}}$  bestimmt werden. Für die Betrachtung aus der Sicht einer möglichen Personengefährdung ist jedoch die Schrittspannung  $U_{\text{S}}$  interessant, welche tatsächlich an einer Person anliegt. Der bereits in Kapitel 3.2.2 angesprochene Unterschied zwischen  $U_{\text{VS}}$  und  $U_{\text{S}}$  kann dabei mit zwei unterschiedlichen Modellvorstellungen erklärt werden:

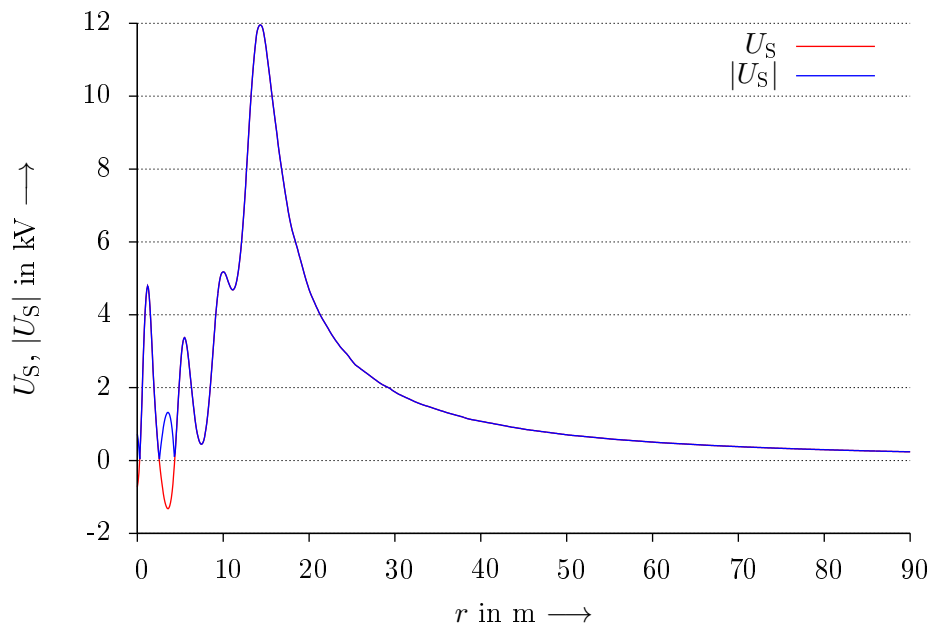
1. Die (leerlaufende) Schrittspannung stellt eine Spannungsquelle dar, wobei der Innenwiderstand der Spannungsquelle bedingt durch die relativ schlechte Leitfähigkeit des Bodens hoch ist. Ein menschlicher Körper stellt dazu eine vergleichsweise niederimpedante Last dar, sodass es zu einem (lokalen) Einbruch der Spannung kommt, sobald sie durch einen Menschen belastet wird.

---

<sup>2</sup>„awk“ ist eine Skriptsprache, die zur zeilenweisen Verarbeitung von Textdateien optimiert ist. Ihr Name setzt sich aus den Anfangsbuchstaben der Nachnamen ihrer Erfinder Aho, Weinberger und Kernighan zusammen.



(a) Oberflächenpotential



(b) Schrittspannungen mit und ohne Betragsbildung der Berechnung

**Abbildung 6.4.:** Oberflächenpotential sowie daraus mit und ohne Betragsbildung berechnete Schrittspannungen um ein Gebäude von  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  bei Verwendung von vier Ringerdern für  $I = 100\text{ kA}$  und linearem Boden ( $\varrho_{\text{Erde}} = 1000\text{ }\Omega\text{m}$ ).

## 6. Voruntersuchungen und Plausibilitätskontrolle des Simulationsmodells

2. Zwischen dem Erdboden und den Füßen des Menschen besteht eine Art intrinsischer Übergangswiderstand, vergleichbar mit dem Ausbreitungswiderstand eines Plattenerders auf der Erdoberfläche. Diese Erdungswiderstände (je einer pro Fuß) bilden mit dem Körperinnenwiderstand einen Spannungsteiler, sodass am Menschen nur eine reduzierte Spannung abfällt.

Die beschriebenen Ausbreitungswiderstände dürfen dabei jedoch *keinesfalls* mit Fremdwiderständen, wie sie beispielsweise Schuhsohlen oder eine Standortisolierung darstellen würden, verwechselt werden. Solche Fremdwiderstände wären gegebenenfalls als weitere Widerstände in den Spannungsteiler mit einzubeziehen.

Der zweite Erklärungsansatz wird dabei unter anderem von NEUHAUS in seinem Kommentar zur VDE 0185 [Neu83] und von der Norm DIN EN 50522 (VDE 0101-2) verfolgt. NEUHAUS nimmt hierzu einen Fuß beziehungsweise beide Füße als Kreisplattenerder an, deren Erdungswiderstand  $R$

$$R = \frac{\varrho}{2D} \quad (6.4)$$

beträgt, wobei  $D$  der Durchmesser der Platte und  $\varrho$  der spezifische Bodenwiderstand ist. Weiterhin wird von NEUHAUS für einen einzelnen Fuß ein Durchmesser  $D = 15\text{ cm}$  und für zwei nebeneinander stehende Füße  $D = 35\text{ cm}$  angenommen.<sup>3</sup> Daraus ergibt sich für einen Fuß ein Widerstand  $R_1$  von

$$R_1 \approx 3,3 \cdot \rho \quad (6.5)$$

Mit diesem Wert, der noch verdoppelt werden muss, da beide Füße getrennt zu werten sind, ergibt sich für den Spannungsteiler aus Erdungswiderständen und Körperwiderstand  $R_K$  ein Teilverhältnis  $\ddot{u}$  von

$$\ddot{u} = \frac{2 \cdot R_1 + R_K}{R_K}, \quad (6.6)$$

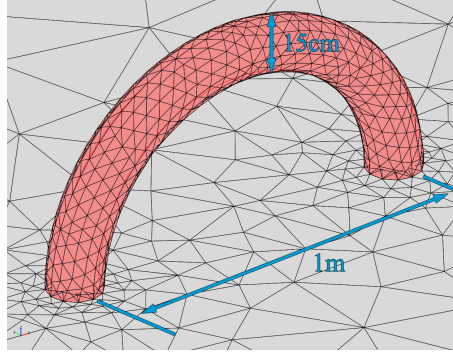
um das sich die leerlaufende Schrittspannung zur tatsächlichen Schrittspannung reduziert. Konkrete Werte für unterschiedliche Bodenleitfähigkeiten und einen Körperwiderstand  $R_K = 1000\ \Omega$  sind in Tabelle 6.1 aufgetragen.

Um dieses Verhältnis auch per Simulation nachzuvollziehen, wurden einige Simulationsreihen durchgeführt. Dazu wurde eine bügelähnliche Struktur auf die Erdoberfläche gesetzt, die so bemessen war, dass sie entsprechend NEUHAUS' Annahme einen Durchmesser von 15 cm, eine Spannweite von Mitte zu Mitte von 1 m und einen Gesamtwiderstand von 1000  $\Omega$  hatte. Abbildung 6.5 verdeutlicht die Anordnung.

---

<sup>3</sup>DIN EN 50522 fordert beim messtechnischen Nachweis von Berührungsspannungen eine Bodenkontaktierungsplatte von 400 cm<sup>2</sup>, was einer kleineren Fläche als einem Kreis mit 35 cm (entspricht gut 9600 cm<sup>2</sup>) entspricht. Dadurch ergibt sich bei der Messung nach DIN EN 50522 ein größerer Erdungswiderstand der Füße und somit ein größerer Unterschied zwischen leerlaufender und tatsächlicher Schrittspannung, das heißt, die Berechnungen von NEUHAUS sind strenger als die Norm.





**Abbildung 6.5.:** Bügel (rot gefärbt, bemaßt und mit Diskretisierungsgitter versehen) zur Simulation des Verhältnisses von leerlaufender zu tatsächlicher Schrittspannung in *COMSOL*.

Dieser Bügel wurde im Bereich  $0 < r \leq 20$  m in 1-m-Schritten und im Bereich  $20 \text{ m} < r < 90$  m in 10-m-Schritten auf der Erdoberfläche verschoben. Dabei wurde jeweils die tatsächliche Schrittspannung zwischen den beiden Bügel Fußpunkten und daraus das Verhältnis zur leerlaufenden Schrittspannung am gleichen Ort bestimmt. Als Grundlage für diese Untersuchungen diente dabei ein Gebäude von  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ , versehen mit einem Fundamentanker und vier Ringerdern nach DIN EN 62305-3<sup>4</sup>. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 6.6 sowie in den Abbildungen B.1 bis B.6 in Anhang B auf Seite 178–180 zu sehen.

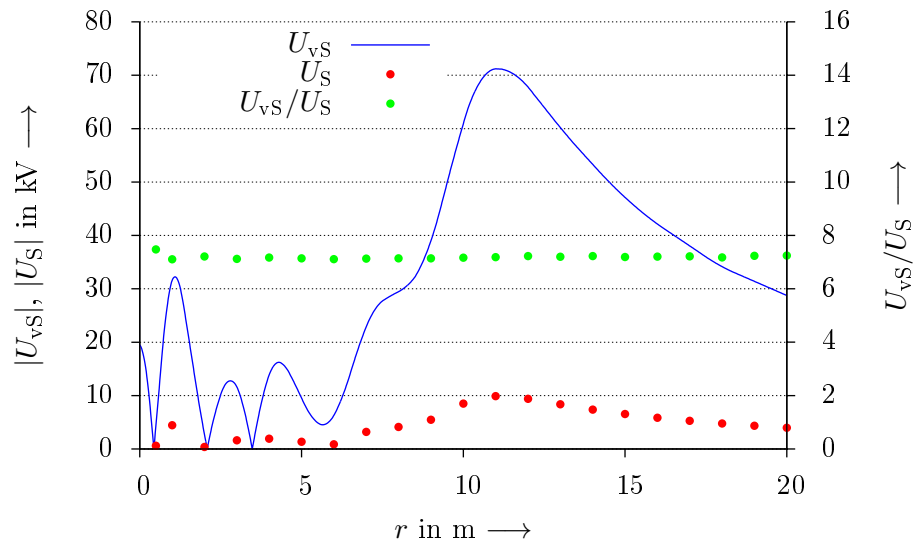
Sämtliche Ergebnisse der Simulationen bezüglich der Quotientenbildung aus  $U_S$  und  $U_{vS}$  sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst. Dabei fällt zunächst die gute Übereinstimmung der Simulationen mit den analytischen Überlegungen von NEUHAUS bei linearem Boden auf.

Es muss jedoch auch beachtet werden, dass das Verhältnis  $U_{vS}/U_S$  für den Fall nichtlinearen Bodens stark mit dem Radius schwankt (siehe dazu auch Abbildung B.6 auf Seite 180) und sich für große Entfernungen  $r$  zudem dem Wert 7,2 für linearen Boden mit  $\varrho = 1000 \Omega \text{m}$  annähert. Da eine Umrechnung von leerlaufenden Schrittspannungen in tatsächliche Schrittspannungen mit dem Faktor 7,0 höhere Werte liefert als mit dem Faktor 7,2, soll im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung der erstere Wert verwendet werden, auch wenn sich dadurch gegebenenfalls etwas höhere Schrittspannungswerte als erwartet ergeben.

Um die Simulationsergebnisse bequem mit dem in Kapitel 5.5 vorgeschlagenen Schrittspannungsgrenzwert vergleichen zu können, werden bei allen folgenden Darstellungen von Simulationsergebnissen ausschließlich die tatsächlichen Schrittspannungen gezeigt. Die Umrechnung erfolgt dabei mit Hilfe der per Simulation gewonnenen Faktoren in Tabelle 6.1.

<sup>4</sup>Die hier gezeigten Ergebnisse unterscheiden sich leicht von denjenigen in Kapitel 7, da hier die Auswertung abweichend nicht entlang der üblichen  $45^\circ$ -Achse erfolgte, sondern entlang einer Achse im  $90^\circ$ -Winkel zur Gebäudewand, von der Mitte einer Wand aus.

## 6. Voruntersuchungen und Plausibilitätskontrolle des Simulationsmodells



**Abbildung 6.6.:** Simulationsergebnisse von leerlaufender und tatsächlicher Schrittspannung bei linearem Boden mit  $\varrho = 1000 \Omega\text{m}$  an einer Vier-Ringerder-Anlage nach VDE um ein Gebäude  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ . ( $I = 100\text{ kA}$ )

**Tabelle 6.1.:** Verhältnis zwischen leerlaufender und tatsächlicher Schrittspannung als Simulationsergebnisse und nach NEUHAUS [Neu83]

$\varrho$	$\sigma$	$U_{VS}/U_S$	nach NEUHAUS
in $\Omega\text{m}$	in $\text{mS/m}$		
100	10	1,64	1,66
200	5	2,3	2,3
500	2	4,1	4,3
900	$1,\overline{1}$	6,6	6,9
1000	1	7,2	7,6
1100	$0,\overline{09}$	7,8	8,3
—	1...10 (nichtlinear)	(7,0)	—

## 6.2. Voruntersuchungen

In den folgenden Unterkapiteln werden die wichtigsten durchgeführten Voruntersuchungen vorgestellt, auf deren Basis substantielle Festlegungen für die weiteren Simulationen getroffen wurden. Dies betrifft sowohl Parameter des Simulationsmodells als auch die Auswertung der Simulationen.

### 6.2.1. Vergleich von stationärer und transients Simulation

In diesem Kapitel soll mit zwei getrennten Abschätzungen gezeigt werden, dass eine rein stationäre Simulation der Erdungsanlagen ausreichend genaue Ergebnisse liefert.

#### Analytische Abschätzung des Einflusses von Wanderwellen

Die relative Permittivität des Erdbodens werde zunächst mit  $\varepsilon_{r,Erde} = 4$  angenommen. Ausgangspunkt für diese Annahme ist die relative Permittivität von Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ )  $\varepsilon_{r,\text{SiO}_2} \approx 4,4 \dots 4,6$  [Hay11], dem chemischen Hauptbestandteil von Sand. Da Sand auch winzige Lufteinschlüsse zwischen den einzelnen Sandkörnern enthält (vgl. auch Kapitel 6.1.3), ist davon auszugehen, dass die tatsächliche relative Permittivität von Sand unterhalb von  $\varepsilon_{r,\text{SiO}_2}$  liegt. Dies lässt sich auch mit der Lichteneggerschen Mischungsregel [Küc05] zeigen, mit deren Hilfe sich die resultierende relative Permittivität  $\varepsilon_{r,res}$  einer Mischung von Einzelstoffen näherungsweise bestimmen lässt:

$$\ln \varepsilon_{r,res} = v_1 \cdot \ln \varepsilon_{r,1} + v_2 \cdot \ln \varepsilon_{r,2} + \dots + v_n \cdot \ln \varepsilon_{r,n} \quad (6.7)$$

(Hierbei sind  $v_1$  bis  $v_n$  die jeweiligen Volumenanteile und  $\varepsilon_{r,1}$  bis  $\varepsilon_{r,n}$  die jeweiligen relativen Permittivitäten der beteiligten Stoffe.)

Somit ergibt sich mit  $\varepsilon_{r,Erde} = 4$  für die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen  $c$  im Boden, relativ zur Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  $c_0$ :

$$\begin{aligned} c &= \frac{1}{\sqrt{\mu_{r,Erde} \cdot \varepsilon_{r,Erde}}} \cdot c_0 \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 \cdot 4}} \cdot c_0 = \frac{1}{2} \cdot c_0 \end{aligned} \quad (6.8)$$

Wie bereits in Kapitel 5.5 geschrieben, sollen in dieser Arbeit hauptsächlich Stoßströme eines Erstblitzes, also Impulse der Form  $10/350 \mu\text{s}$ , betrachtet werden. Aus einem solchen Impuls lässt sich die höchste enthaltene Frequenz dergestalt abschätzen, dass die Anstiegszeit als ein Viertel der Periodendauer  $t$  angenommen wird. Somit gilt für die höchste Frequenz  $f_{\max}$ :

$$f_{\max} \approx \frac{1}{t} = \frac{1}{4 \cdot 10 \mu\text{s}} = 25 \text{ kHz} \quad (6.9)$$

## 6. Voruntersuchungen und Plausibilitätskontrolle des Simulationsmodells

Daraus folgt in Verbindung mit (6.8) für die Wellenlänge  $\lambda$  im Erdboden:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{0,5 \cdot c_0}{25 \text{ kHz}} \approx 6 \text{ km} \quad (6.10)$$

Somit kann das hier untersuchte Gebiet von wenigen Dutzend Metern um das zu schützende Gebäude herum als elektrisch kurze Strecke angenommen werden und Wanderwelleneffekte und Ähnliches müssen nicht berücksichtigt werden. Daher liefert auch eine stationäre Berechnung ausreichend genaue Ergebnisse.

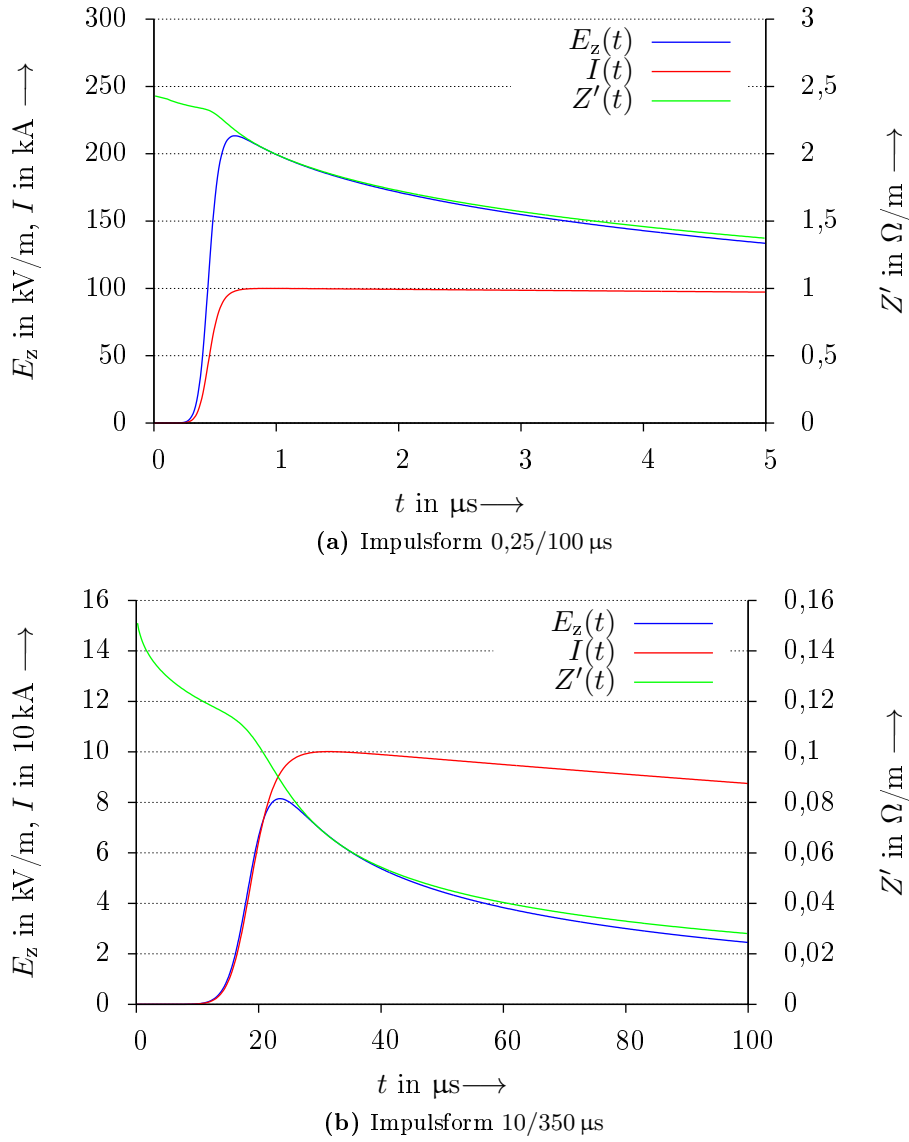
Geht man jedoch davon aus, dass der Erdboden feucht ist, ist nach (6.7) mit einer höheren relativen Permittivität des Bodens zu rechnen ( $\epsilon_{r, \text{H}_2\text{O}} \approx 80$  [Hay11]). Nimmt man exemplarisch für die relative Permittivität des Bodens einen zehnfach höheren Wert an ( $\epsilon_{r, \text{Erde}} = 40$  – nach (6.7) beispielsweise bei ca. 24 Volumenprozent  $\text{SiO}_2$ , 76 Volumenprozent Wasser und 0 Prozent Luft, also sehr feuchter Boden), ergibt sich nach (6.8) und (6.10)  $\lambda \approx 1,9 \text{ km}$ , was immer noch sehr groß gegenüber den Abmessungen der untersuchten Erdungsstrukturen ist.

Zu dieser Methode der analytischen Abschätzung sei noch angemerkt, dass Feuchtigkeit im Boden nicht nur dessen relative Permittivität, sondern auch dessen Leitfähigkeit erhöht (vgl. Abbildung 6.2). Durch eine Erhöhung der Bodenleitfähigkeit sinken bei einer gegebenen Anordnung jedoch auch die resultierenden Schrittspannungen, wie Abbildung 6.23 auf Seite 92 zeigt, wodurch das Schrittspannungsproblem insgesamt weniger kritisch wird.

### Simulative Abschätzung des Einflusses der zeitabhängigen Impedanz der Erderstruktur

Ein anderer Ansatz ist die Überprüfung mit Hilfe einer Feldsimulation. Dazu wurde zur Vereinfachung und Minimierung des Rechenaufwandes eine zweidimensionale, transiente Magnetfeld-Simulation verwendet: Es wurde ein Rundleiter mit einem Durchmesser  $d_L = 1 \text{ cm}$  modelliert, der konzentrisch von einem kreisförmigen Bereich Erdboden mit  $r_E = 1 \text{ m}$  umgeben ist. Der Leiter bekam als Materialwerte  $\sigma = 1 \cdot 10^7 \text{ S/m}$  und  $\mu_r = 800$  [Hay11] zugewiesen, der Boden  $\sigma = 0,001 \text{ S/m}$  (siehe oben) und  $\mu_r = 1$ . In den Leiter wurden Strom-Impulse der Form  $10/350 \mu\text{s}$  und  $0,25/100 \mu\text{s}$  eingepreßt, wobei diese mittels der Zeitfunktion aus DIN EN 62305-1 (VDE 0185-305-1), Anhang B definiert wurden. Der Strom hatte in beiden Fällen eine maximale Amplitude von  $100 \text{ kA}$ . Zur Auswertung der Simulation wurde die elektrische Feldstärke in Längsrichtung  $E_z$  auf der Leiteroberfläche ermittelt, welche identisch zum bezogenen Spannungsfall  $U'$  längs des Leiters ist. Zusätzlich wurde für jeden Zeitpunkt aus den jeweiligen Momentanwerten von  $I(t)$  und  $E_z(t)$  der Impedanzbelag der Leitung  $Z'(t)$  bestimmt. Alle drei Angaben sind in Abbildung 6.7 zu sehen.

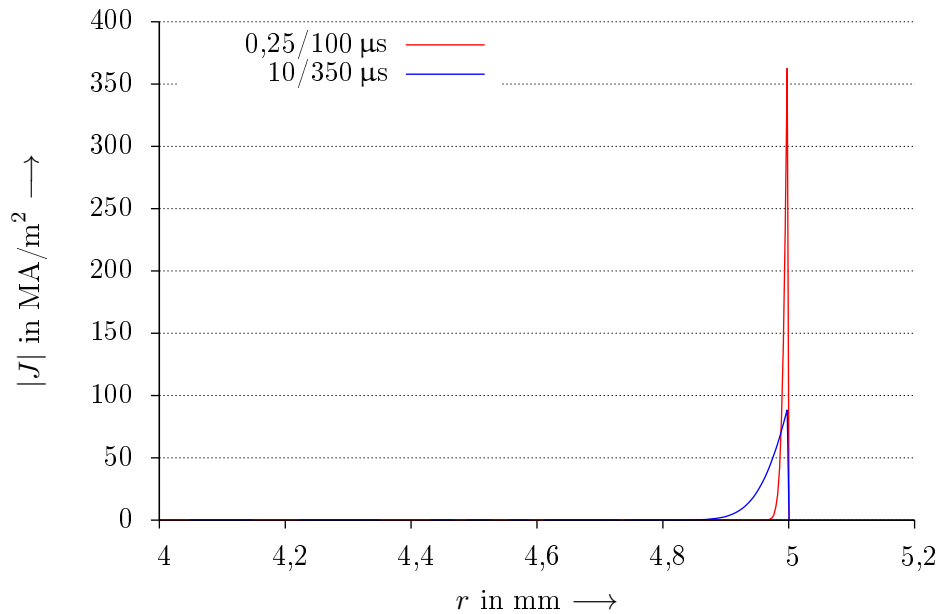
Dass der Impedanzbelag bei beiden Impulsformen im Bereich zwischen  $t = 0$  und der ansteigenden Impulsflanke größer ist als beim jeweiligen Impulsanstieg und Impulsmaximum, ist ein Ergebnis numerischer Ungenauigkeiten: Hier werden zur



**Abbildung 6.7.:** Strom  $I(t)$ , elektrisches Feld in Längsrichtung  $E_z$  und Impedanzbelag  $Z'$  an einem Stahl-Rundleiter mit 10 mm Durchmesser bei verschiedenen Impulsformen jeweils für  $\hat{I} = 100 \text{ kA}$

## 6. Voruntersuchungen und Plausibilitätskontrolle des Simulationsmodells

Impedanzermittlung zwei jeweils sehr kleine Zahlenwerte dividiert, sodass bereits kleine Abweichungen bei  $E_z(t)$  und  $I(t)$  zu größeren Abweichungen bei  $Z'(t)$  führen.



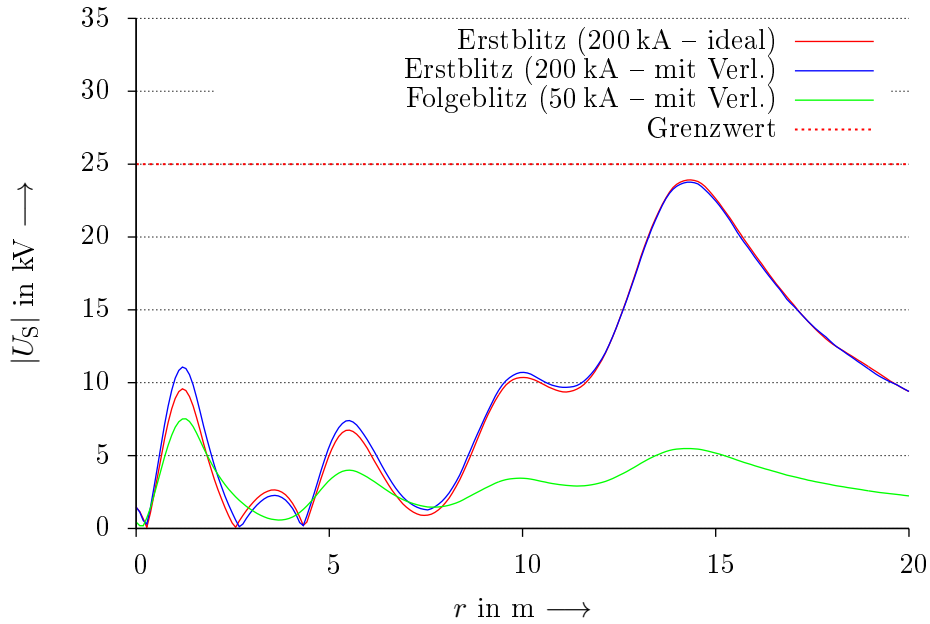
**Abbildung 6.8.:** Stromdichteverteilung in einem Stahl-Rundleiter mit einem Durchmesser von 10 mm in Abhängigkeit des Radius  $r$  für zwei unterschiedliche Impulsformen, jeweils zum Zeitpunkt des Impulsscheitels ( $\hat{I} = 100$  kA). Der Bereich  $0 < r < 4$  mm ist im Diagramm nicht dargestellt, da hier kein Strom fließt.

Außerdem ist an Hand der Simulationen gut zu erkennen, wie sich im Rundleiter in Abhängigkeit von der Impulsform ein unterschiedlich stark ausgeprägter Skin-Effekt mit einer Eindringtiefe von nur wenigen Mikrometern ausbildet, wie Abbildung 6.8 zeigt. Hierbei ist die Stromdichteverteilung im Rundleiter für beide untersuchte Impulsformen zum Zeitpunkt des jeweiligen Impulsscheitels dargestellt. Der Radius  $r$  ist dabei vom Mittelpunkt des Leiters aus gemessen, Werte für  $r > 5$  mm liegen demnach im umgebenden Erdboden.

Um die Ergebnisse dieser transienten Simulationen weiter beurteilen zu können, wurde eine Vier-Ringerder-Anlage gemäß Kapitel 7.1.2 (Gebäudegröße 10 m  $\times$  10 m, linearer Boden) so modifiziert, dass die Verbindungsleiter nicht wie bei den übrigen Simulationen hochleitfähig waren, sondern einen Widerstandsbelag  $R'$  entsprechend der zuvor ermittelten Werte ( $0,16 \Omega/\text{m}$  für 10/350 µs bzw.  $2,5 \Omega/\text{m}$  für 0,25/100 µs) aufwiesen. Dabei wurde von jeweils vier parallel geschalteten Verbindungen zwischen den Ringen ausgegangen. Die Simulationen wurden mit den für Gefährdungspegel I relevanten Strömen durchgeführt: Ein Erstblitz mit 200 kA und dem Widerstands-/Impedanzbelag für 10/350 µs sowie ein Folgeblitz mit 50 kA und dem Impedanzbelag für 0,25/100 µs. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.9 zu sehen, wobei die drei Graphen

darin folgende Bedeutung haben:

- „Erstblitz (200 kA, ideal)“: Simulation mit 200 kA und hochleitfähigen Verbindern zwischen den Ringen – identisch mit den Simulationen in Kapitel 7.1.2,
- „Erstblitz (200 kA, mit Verl.)“: Simulation mit 200 kA und  $0,16 \Omega/\text{m}$  Widerstandsbelag auf den Verbindern.
- „Folgeblitz (50 kA, mit Verl.)“: Simulation mit 50 kA und  $2,5 \Omega/\text{m}$  Widerstandsbelag auf den Verbindern.



**Abbildung 6.9.:** Vergleich von idealen und verlustbehafteten Verbindungsleitern an einer Vier-Ringerder-Anlage für Erst- und Folgeblitz bei Blitzschutz-Gefährdungspegel I. Nähere Erläuterung siehe Haupttext.

Dabei werden im Wesentlichen zwei Aspekte deutlich: Zum einen sind zwar Abweichungen zwischen der Erstblitz-Simulation mit hochleitfähigen und mit verlustbehafteten Verbindungsleitern erkennbar, jedoch bewegen sich diese in einem noch akzeptablen Rahmen: Am Ort  $r \approx 1,2 \text{ m}$  beträgt die Schrittspannung bei hochleitfähigen Verbindungen (roter Graph in Abbildung 6.9) ungefähr  $U_S \approx 9,6 \text{ kV}$ , bei einem erhöhten Widerstandsbelag (grüner Graph in Abbildung 6.9) ungefähr  $U_S \approx 11,1 \text{ kV}$ . Somit beträgt die maximale prozentuale Abweichung  $11,1 \text{ kV} / 9,6 \text{ kV} - 1 \approx 15 \%$ . Dies erscheint zunächst viel, relativiert sich jedoch durch die zahlreichen im Vorfeld getroffenen Worst-Case-Annahmen sowie durch den an dieser Stelle deutlich größeren Abstand zum Schrittspannungsgrenzwert. Zu erkennen ist hier außerdem, dass durch die verlustbehafteten Verbinder die äußeren Erderringe leicht entkoppelt werden und dadurch die Schrittspannungen in deren Nähe etwas absinken. Im Gegensatz

## 6. Voruntersuchungen und Plausibilitätskontrolle des Simulationsmodells

dazu werden die inneren Erderringe etwas stärker belastet, sodass die Schrittspannungen hier etwas ansteigen. Speziell bei den Ringerder-Anordnungen ist dies jedoch kein Problem, da hier die Schrittspannungen im Inneren ohnehin deutlich niedriger sind als am Rand. Auch dies trägt dazu bei, die oben genannten Abweichungen als akzeptabel anzusehen.

Zum anderen bleiben trotz des deutlich höheren Widerstandbelages beim Folgeblick die resultierenden Schrittspannungen insgesamt deutlich unter denen des Erstblitzes.

Zusammenfassend lässt sich somit sagen, dass die stationären Gleichstrom-Simulationen mit hochleitfähigen Erdungsleitern Ergebnisse liefern, die eine akzeptable Abweichung von einer genaueren, aber wesentlich aufwändigeren transienten Simulation aufweisen. Zudem ist hiermit auch die bereits in Kapitel 5.5 erwähnte Festlegung auf eine Betrachtung ausschließlich des positiven Erstblitzes bestätigt, da dies offensichtlich den kritischsten Fall darstellt.

### Abschätzung des Rechen-Aufwandes bei stationärer und transients Simulation

Eine echt-transiente Simulation bedeutet einen deutlich größeren Berechnungsaufwand als eine stationäre Simulation der gleichen Geometrie, speziell bei Blitzphänomenen. Der Grund hierfür liegt nicht allein im transienten Löser als solches, sondern auch im dazu nötigen feineren Diskretisierungsgitter: Der transiente Vorgang führt in den Erdungsleitern wegen des Skin-Effekts zu einer nur sehr geringen äquivalenten Leitschichtdicke  $\delta$ , welche sich über

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho_{\text{Fe}}}{2\pi f \cdot \mu_0 \mu_{\text{r,Fe}}}} \quad (6.11)$$

abschätzen lässt, wenn die äquivalenten Frequenzen aus der Abschätzung (6.9) verwendet werden. Geht man davon aus, dass der Erdungsleiter aus Stahl besteht, und nimmt für dessen Materialwerte  $\rho_{\text{Fe}} = 0,1 \mu\Omega\text{m}$  und  $\mu_{\text{r,Fe}} = 800$  an [Hay11], ergibt sich nach (6.11)  $\delta \approx 35 \mu\text{m}$  für einen 10/350- $\mu\text{s}$ -Impuls und  $\delta \approx 5,6 \mu\text{m}$  für einen 0,25/100- $\mu\text{s}$ -Impuls. Diese Werte decken sich näherungsweise mit den in Abbildung 6.8 dargestellten Simulationsergebnissen. Die Abweichungen erklären sich dadurch, dass die obige Abschätzung auf der Basis von (6.9) eine relativ hohe äquivalente Frequenz zu Grunde legt. Tatsächlich enthalten beide Impulsformen auch große Anteile deutlich niedrigerer Frequenzen, wie das Amplitudendichtespektrum der Impulse unter anderem in der DIN EN 62305-1:2011-10 [EN62305-1] (dort Bild B.7) zeigt.

Um diesen Skin-Effekt im Simulationsmodell korrekt nachbilden zu können, darf die Kantenlänge der einzelnen Diskretisierungselemente (Gitterzellen) maximal in der Größenordnung der Eindringtiefe liegen, eine noch kleinere Kantenlänge wäre jedoch auf jeden Fall vorzuziehen. Um in einem Rundleiter mit  $d = 1 \text{ cm}$  und  $l = 1 \text{ m}$  alleine die äußerste Schicht der Mantelfläche mit annähernd kubischen Elementen



mit einer Kantenlänge  $\Delta l = 5 \mu\text{m}$  zu diskretisieren, wären demnach

$$n = \frac{\pi \cdot d}{\Delta l} \cdot \frac{l}{\Delta l} = \frac{\pi \cdot 1 \text{ cm}}{5 \mu\text{m}} \cdot \frac{1 \text{ m}}{5 \mu\text{m}} \approx 1,26 \cdot 10^9 \quad (6.12)$$

notwendig. Um das 1-m-Leiterstück vollständig zu diskretisieren, wären noch deutlich mehr Gitterzellen erforderlich, da erstens auch der Innenraum des Leiters diskretisiert werden muss und zweitens meist – wie in *COMSOL* – tetraedrische Gitterzellen verwendet werden, welche bei gleicher Kantenlänge ein geringeres Volumen als kubische Zellen umfassen. Die genaue Anzahl der benötigten Gitterzellen hängt von weiteren *Meshing*-Parametern ab und lässt sich nicht pauschal angeben.

Wird jedoch auf eine transiente Simulation verzichtet, müssen Skin-Effekte nicht berücksichtigt werden und der oben genannte Leiter kann im Extremfall mit lediglich 336 Gitterzellen<sup>5</sup> diskretisiert werden, was einer extremen Verringerung gegenüber der nach (6.12) abgeschätzten über 1 Milliarde Zellen entspricht. Damit einher gehen zudem auch größere und damit insgesamt weniger Gitterzellen im umgebenden Erdboden.

Welche Auswirkung die Anzahl der Gitterzellen auf die Rechenzeit im stationären und transienten Fall hat, ist in Abbildung 6.10 exemplarisch für das im vorherigen Abschnitt beschriebene zweidimensionale Simulationsmodell eines Rundleiters dargestellt. Alle Angaben sind durch *COMSOL* selbst ermittelt und wurden auf demselben handelsüblichen PC-System<sup>6</sup> erzielt. Sie sind jedoch lediglich als Anhaltspunkte zu verstehen, da die Rechenzeiten durch Hintergrundaktivität des Betriebssystems usw. einer gewissen Streuung unterliegen. Sowohl die stationären als auch die transienten Simulationen wurden mit zwei verschiedenen Lösungs-Algorithmen (UMFPACK<sup>7</sup> und CG<sup>8</sup>) durchgeführt. Bei den transienten Simulationen wurde ein 10/350- $\mu\text{s}$ -Impuls im Zeitbereich  $0 \leq t \leq 100 \mu\text{s}$  mit einer Ergebnis-Ausgabe in 1000 Zwischenschritten und einer zeitlichen Auflösung von 5 ns berechnet.

Dabei ist zu beachten, dass bei der transienten Simulation aus oben genanntem Grund (ausreichende räumliche Auflösung des Skin-Effektes) ausschließlich die Simulation mit der höchsten hier gezeigten Anzahl von Gitterzellen akzeptable Ergebnisse liefert. Die transienten Simulationen mit geringerer Anzahl von Zellen dienen lediglich zum Vergleich des Rechenzeitbedarfs.

An Hand von Abbildung 6.10 ist zu erkennen, dass bei der Wahl eines geeigneten Lösungsalgorithmus der Rechenzeitbedarf ungefähr linear mit der Anzahl der Gitterzellen ansteigt. Zudem hat erwartungsgemäß die transiente Simulation bei gleicher Zellenanzahl einen deutlich höheren Rechenzeitbedarf. Da bei einer stationären Simulation im Gegensatz zu einer transienten Simulation bereits das grösste hier untersuchte Diskretisierungsgitter genügt, um ausreichend exakte Ergebnisse zu erhalten,

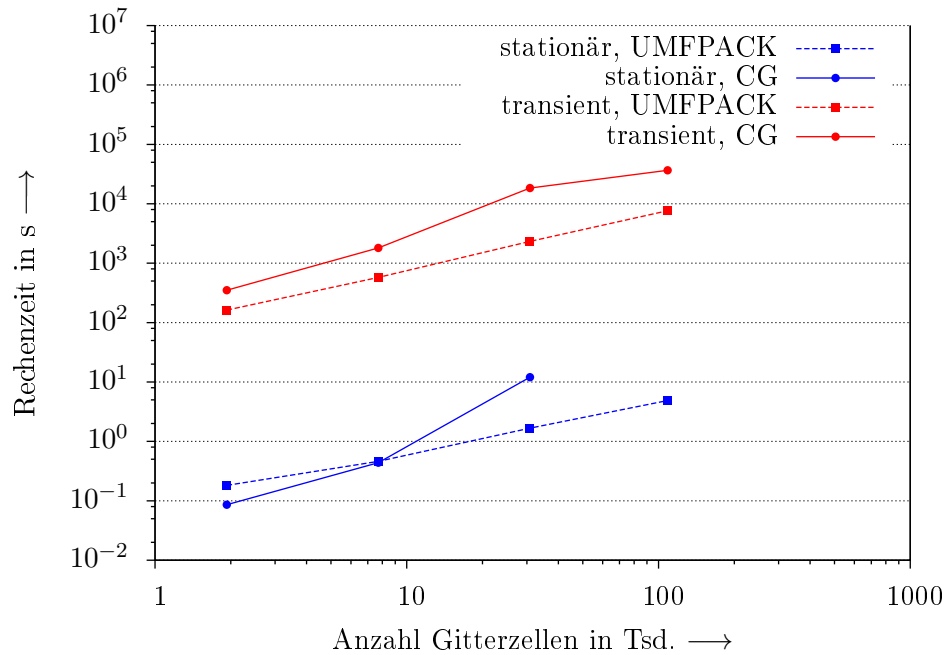
<sup>5</sup>Ergebnis des automatischen *Meshings* von *COMSOL* mit Standardeinstellungen

<sup>6</sup>Prozessor: Intel i5-760 (vier Kerne à 2,66 GHz), Arbeitsspeicher 8 GiB

<sup>7</sup>UMFPACK: „*Unsymmetric Multi-Frontal Package*“. Eine Programmbibliothek zum Lösen unsymmetrischer dünnbesetzter Gleichungssysteme [Dav13] mit der Multi-Frontal-Methode nach DAVIS und DUFF [DD97].

<sup>8</sup>CG: „*conjugate gradients*“, dt.: „Verfahren der konjugierten Gradienten“ [KA00]

## 6. Voruntersuchungen und Plausibilitätskontrolle des Simulationsmodells



**Abbildung 6.10.:** Rechenzeitbedarf in Abhängigkeit der Anzahl der Gitterzellen für stationäre und transiente Simulation derselben 2D-Geometrie sowie für verschiedene Lösungs-Algorithmen

ergibt sich in diesem Fall für stationäre Simulationen ein Zeit-Vorteil um etwa fünf Größenordnungen.

Zusammenfassend lässt sich somit feststellen, dass eine stationäre Simulation der Erdungsanlage den Vorteil einer erheblichen Einsparung von Rechenzeit bietet und es somit ermöglicht, in gegebener Zeit deutlich mehr unterschiedliche Varianten zu untersuchen. Der prinzipielle Nachteil sind dabei Abweichungen vom tatsächlichen Ergebnis, die sich jedoch, wie gezeigt, in einem akzeptablen Rahmen bewegen. Daher ist in dieser Arbeit den stationären Simulationen der Vorzug gegeben worden.

### 6.2.2. Einfluss von Kellerwänden und Betonarmierungen auf Schrittspannungen

#### Einfluss von Armierung in der Fundamentplatte

Wie in Kapitel 7.1.1 beschrieben, wurden bei allen in dieser Arbeit gezeigten Simulationen die Fundamentplatte eines Gebäudes stets als reine Betonplatte ohne Armierung modelliert oder sogar ganz weggelassen (siehe z. B. Tiefen- und Schrägerder). In der Praxis ist jedoch davon auszugehen, dass eine Fundamentplatte mit Stahlbewehrung versehen ist, welche – sofern die Bodenplatte gegenüber dem Erdboden nicht elektrisch isoliert ist, vgl. Kapitel 6.1.2 – einen Einfluss auf die Stromverteilung und damit auf die entstehenden Schrittspannungen haben könnte.

Zwecks vereinfachter Modellierung und Reduzierung des Rechenzeitbedarfs wurde dabei die Armierung nicht mit diskreten Stäben realer Baustahlmatten nachgebildet, sondern als massiver Stahlkörper, der – wie der Fundamenterder und die angenommene Armierung – eine Betonüberdeckung von 5 cm aufweist. Diese Vereinfachung entstand aus der Überlegung heraus, dass der Stahl der Armierung eine Leitfähigkeit besitzt, die um mehrere Größenordnungen über der von Beton liegt. Somit ist davon auszugehen, dass sich der Strom im Wesentlichen auf die Armierung konzentriert und lediglich auf der 5-cm-Strecke zwischen Bewehrung und Erdboden durch den Beton fließt. Dass diese Annahme mit akzeptabler Genauigkeit zutreffend ist, haben auch Voruntersuchungen per Simulation bestätigt, die jedoch aus Platzgründen hier nicht dargestellt sind.

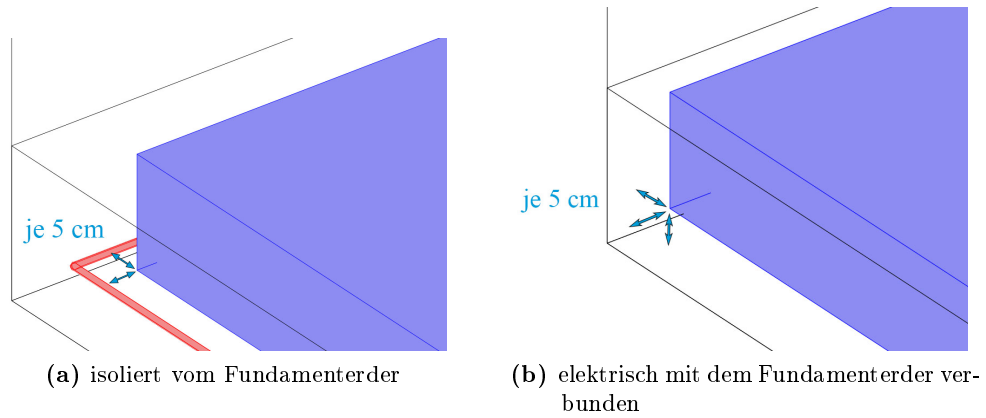
Als Ausgangsmodell für diese Untersuchung diente ein Gebäude von 10 m × 10 m. Es wurden dabei zwei mögliche Fälle bezüglich der Kontaktierung der Armierung modelliert:

- Eine Armierung, die nicht elektrisch mit dem Fundamenterder verbunden ist. Dazu hat der Bewehrungskörper allseitig einen Abstand von 5 cm vom Fundamenterder sowie einen Abstand von 5 cm zur Unterkante der Fundamentplatte (vgl. Abbildung 6.11a).
- Eine Armierung, die elektrisch mit dem Fundamenterder kontaktiert ist. Dabei wurde der Fundamenterder weggelassen und stattdessen der Bewehrungskörper seitlich ausgedehnt, sodass er auch 5 cm Abstand vom Rand der Fundamentplatte hat (vgl. Abbildung 6.11b).

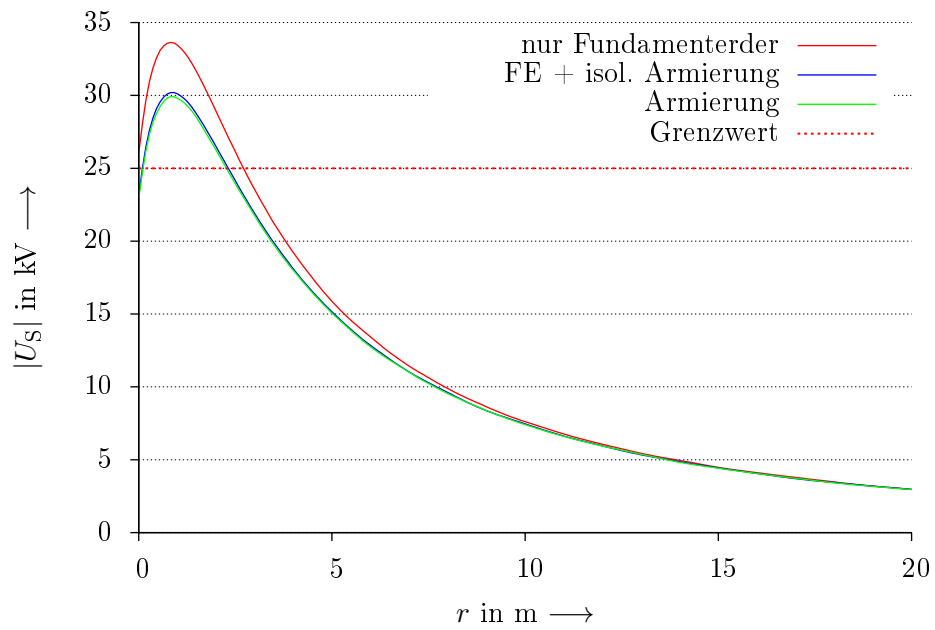
Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.12 zu sehen. Dabei ist zum Vergleich auch der Schrittspannungsverlauf eines Fundamenterders ohne jegliche Armierung eingezeichnet. Die Ergebnisse sowohl der nicht kontaktierten („FE + isol. Armierung“ in Abbildung 6.12) als auch der elektrisch kontaktierten Armierung („Armierung“ in Abbildung 6.12) liegen dabei niedriger als bei Berücksichtigung eines Fundamenterders alleine. Außerdem fällt auf, dass sich die Ergebnisse der beiden Bewehrungsvarianten nur minimal unterscheiden.

Im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung wurden für die Simulationen der übrigen Fundamenterder und Fundamenterder-Ringerder-Kombinationen (Kapitel 7.1.1 und

## 6. Voruntersuchungen und Plausibilitätskontrolle des Simulationsmodells



**Abbildung 6.11.:** Modellierung zweier unterschiedlicher Armierungsvarianten (Armierung blau gefärbt) der Fundamentplatte in *COMSOL*



**Abbildung 6.12.:** Schrittspannungen an einem Gebäude  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  für  $I = 100\text{ kA}$  bei verschiedenen Ausführungen von Armierungen der Fundamentplatte ( $\rho_{\text{Erde}} = 1000\text{ }\Omega\text{m}$ )

7.1.2) keine Fundamentarmierungen berücksichtigt, zumal bei der Ausführung eines Kellers in thermischer und/oder hydraulischer Isolierung der Fundamenterde ohnehin nicht in der Bodenplatte, sondern außerhalb der Isolierschicht(en) und damit außerhalb der Fundamentplatte verlegt wird.

### **Einfluss von Kellerwänden**

Als Erweiterung der im vorherigen Abschnitt vorgestellten Untersuchungen zum Einfluss der Armierung einer Fundamentplatte wurde auch der Einfluss von eingeschränkt leitfähigen Wänden auf die resultierenden Schrittspannungen betrachtet. Dazu wurden in ein Gebäude der Größe  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  ringsum Kellerwände mit einer Dicke von  $20\text{ cm}$  und demselben spezifischen Widerstand wie die Beton-Bodenplatte ( $\rho = 300\ \Omega\text{m}$ ) modelliert. Die Wände wurden dabei in zwei Varianten ausgeführt:

- Wände nur aus Beton, Fundamentplatte ebenfalls ohne Armierung
- Wände mit einer Armierung, die analog zur Armierung in Abschnitt 6.2.2 modelliert wurde und mit einer Armierung der Fundamentplatte leitfähig verbunden war.

Als Beispiele wurden zwei Erderkonfigurationen gewählt:

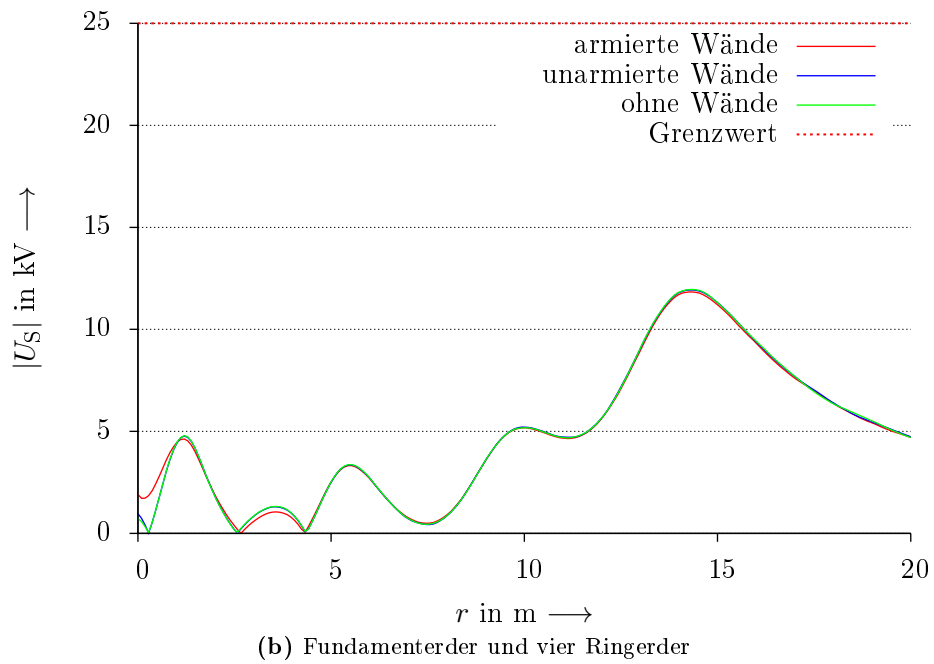
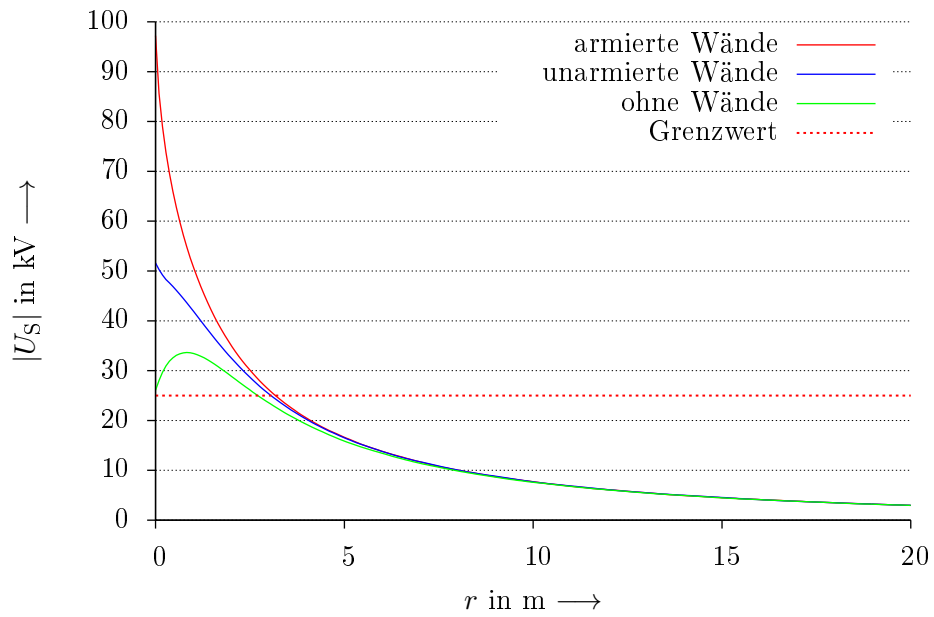
- Ein einzelner Fundamenterder entsprechend Kapitel 7.1.1
- Ein Fundamenterder mit vier Ringerdern entsprechend Kapitel 7.1.2

Die Ergebnisse für alle untersuchten Kombinationen für linearen Boden und  $I = 100\text{ kA}$  sind in Abbildung 6.13 zu sehen. Dabei ist augenfällig, dass der Einfluss der Kellerwände abhängig von der Erderkonfiguration unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Im Fall der Verwendung eines Fundamenteders zusammen mit vier Ringerdern (Abbildung 6.13b) ist kaum ein Unterschied zu erkennen, lediglich bei Berücksichtigung armierter Kellerwände ist die Schrittspannung unmittelbar am Gebäude leicht erhöht. Anders jedoch bei der Verwendung eines Fundamenteders alleine (Abbildung 6.13a): Hier ist der Einfluss der Kellerwände sehr groß, die Schrittspannungen steigen um ein Vielfaches an.

Der Grund für beide Verhalten ist in der Erderkonfiguration und der Position der einzelnen Erder im Erdboden zu suchen: Bei Verwendung einer Vier-Ringerder-Anlage befindet sich der innerste Erder relativ dicht am Gebäude ( $1\text{ m}$  Abstand) und auch dicht unter der Erdoberfläche ( $50\text{ cm}$  Verlegetiefe), sodass sich gebäudenah bereits blitzstromtragende Leiter und damit auch entsprechend hohes elektrisches Potential nahe der Erdoberfläche befindet. Das zusätzliche Hochpotential, das Kellerwände – auch mit Armierung – in diesen Bereich bringen, ist im Vergleich zu dem des innersten Ringerders nicht relevant.

Im Gegensatz dazu liegen bei einem einzelnen Fundamenterder alle blitzstromtragenden Teile ca.  $2\text{ m}$  unter der Erdoberfläche (sofern die Ableitung bis zum Fundamenterder isoliert erfolgt). Hier bringt selbst die relativ schwach leitfähige Wand

## 6. Voruntersuchungen und Plausibilitätskontrolle des Simulationsmodells



**Abbildung 6.13.:** Schrittspannungen an einem Gebäude  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  für  $I = 100\text{ kA}$  bei unterschiedlichen Erderkonfigurationen und verschiedenen Umsetzungen von Kellerwänden im Simulationsmodell ( $\varrho_{\text{Erde}} = 1000\ \Omega\text{m}$ )

ohne Armierung hohe elektrische Potentiale deutlich besser an die Erdoberfläche als der Erdboden alleine und sorgt dort für eine Erhöhung der Schrittspannung. Eine hochleitfähige Armierung verschärft das Problem zusätzlich.

Vor diesem Hintergrund muss ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass die Ausführung von Kellerwänden – gegenüber dem Erdboden isoliert oder nicht – in Abhängigkeit von der Ausführung der Erderanlage deutlichen Einfluss auf die resultierenden Schrittspannungen haben kann.

### 6.2.3. Einfluss der Größe des Simulationsgebiets

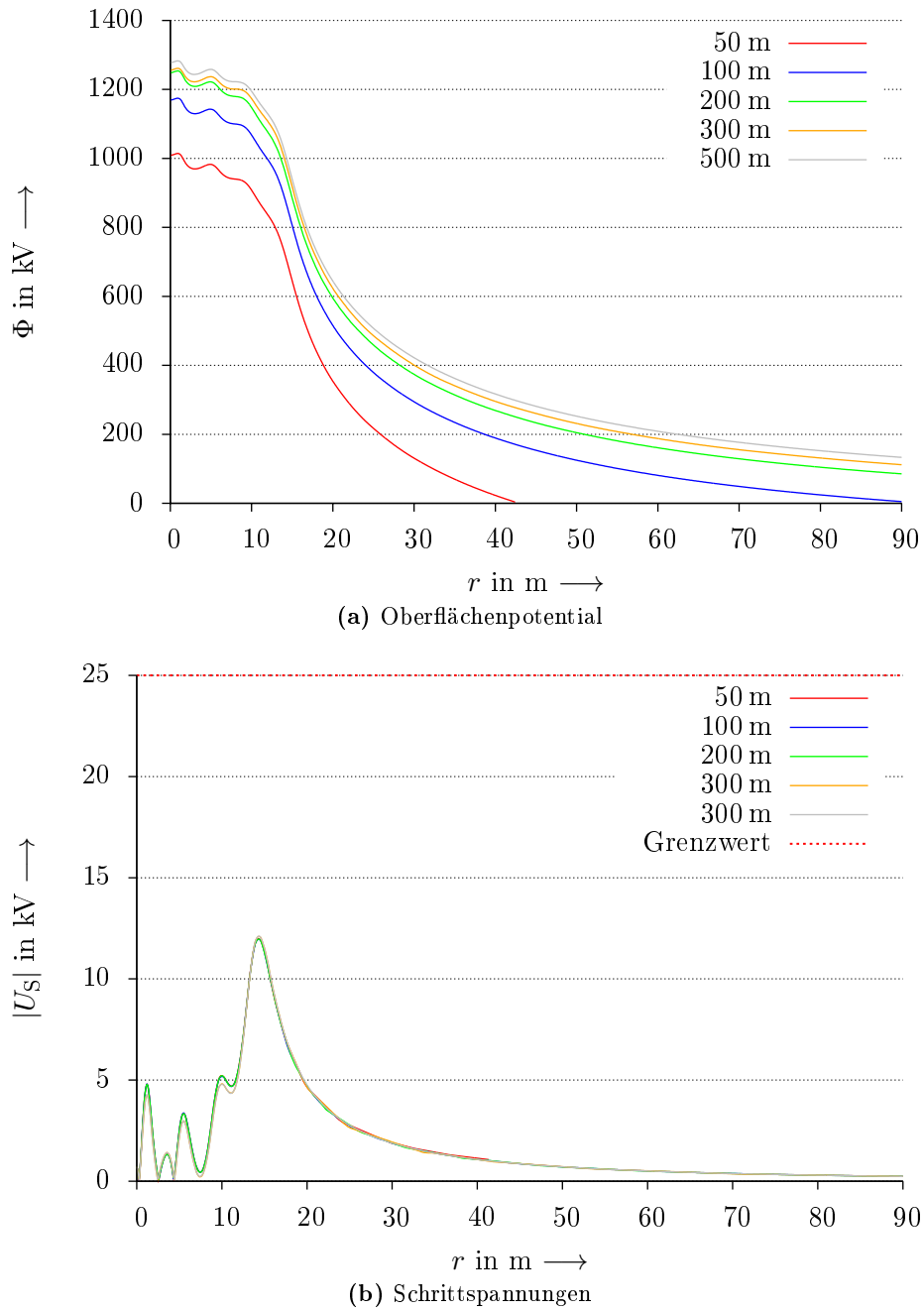
Wie in Kapitel 6.3.1 gezeigt wurde, sind die Abweichungen zwischen der Simulation in einem räumlich begrenzten Simulationsgebiet und einer idealen Betrachtung in einem unendlich großen Halbraum als Erdboden vernachlässigbar klein, wenn die untersuchte Erderanlage sehr klein gegenüber dem Simulationsgebiet ist. Es stellt sich jedoch auch die Frage, wie groß die Abweichungen werden, wenn der Größenunterschied zwischen Erdungsanlage und Simulationsraum kleiner wird. Hierzu wurde ein Gebäude von  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  mit einer Vier-Ringerder-Anlage gemäß Kapitel 7.1.2 versehen (dabei hat der äußerste Ringerder eine räumliche Ausdehnung von  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ ) und der Außenradius  $r_a$  des Berechnungsgebietes in einem Bereich von  $50\text{ m}$  bis  $500\text{ m}$  variiert. Die Ergebnisse, sowohl für das ermittelte elektrische Potential auf der Erdoberfläche als auch für die resultierenden Schrittspannungen sind für einen Blitzstrom von  $100\text{ kA}$  und linearen Boden in Abbildung 6.14 zu sehen.

Wie zu erkennen ist, hängt die Höhe des resultierenden Oberflächenpotentials sehr stark von der Größe des Berechnungsgebietes ab und hat offensichtlich selbst für  $r_a = 300\text{ m}$  noch nicht den Endwert für eine ideale unendlich weit entfernte Erde erreicht. Im Gegensatz dazu zeigen die Schrittspannungen praktisch keine Abhängigkeit von  $r_a$ , selbst für den sehr kleinen Wert von  $r_a = 50\text{ m}$ , bei dem die Ausdehnung der Erdungsanlage bereits ca. 30–40 % der Größe des Berechnungsgebietes entspricht. Aus diesen Ergebnissen lassen sich somit zwei wichtige Schlüsse ziehen:

1. Für die Bestimmung der hier hauptsächlich interessierenden Schrittspannungen ist die Größe des Berechnungsgebietes über einen sehr weiten Bereich nicht maßgebend. Daher kann davon ausgegangen werden, dass auch bei der Untersuchung der größten hier vorgestellten Erdungsanlage (vier Ringerder um ein Gebäude der Größe  $10\text{ m} \times 50\text{ m}$ ) im gewählten Berechnungsgebiet mit  $r_a = 100\text{ m}$  ausreichend exakte Ergebnisse erhalten werden.
2. Im Gegensatz dazu sind gerade bei größeren Erdungsanlagen die erhaltenen Potentialwerte nur sehr eingeschränkt aussagekräftig. Gleiches gilt für aus dem Potential abgeleitete Werte wie beispielsweise den Erdungswiderstand. Hier können leicht Abweichungen von 25 % und mehr gegenüber dem realen Wert auftreten.

Dieses Verhalten kann auch theoretisch begründet werden: Sofern das Simulationsgebiet groß genug ist, dass sich um die Erdungsanlage das elektrische Strömungsfeld

## 6. Voruntersuchungen und Plausibilitätskontrolle des Simulationsmodells



**Abbildung 6.14.:** Oberflächenpotential und Schrittspannungen um ein Gebäude  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  für linearen Boden und  $I = 100\text{ kA}$  bei Variation des Außenradius  $r_a$  des Berechnungsgebietes ( $\varrho_{\text{Erde}} = 1000\ \Omega\text{m}$ )



in Halbkugelform wie in Kapitel 6.1.2 beschrieben, selbstständig – also nicht von den Randbedingungen der Simulation erzwungen – einstellt, ist die Stromverteilung im Simulationsgebiet identisch mit derjenigen in einem unendlich weit ausgedehnten Halbraum. Da für die Berechnung der Schrittspannung immer nur ein Intervall in der Länge der Schrittweite (also 1 m) betrachtet wird, müssen die Schrittspannungen unter der zuvor genannten Voraussetzung in der räumlich begrenzten Simulation zwangsläufig mit den Schrittspannungen im idealen Halbraum übereinstimmen.

Anders jedoch beim absoluten Potential des Erders: Dieses bestimmt sich über die Integration von der unendlich weit entfernten Erde beziehungsweise vom Rand des Simulationsgebiets bis zum Erder (vgl. (6.22) und (6.25)). Da das Simulationsgebiet nicht unendlich ausgedehnt ist, ergibt sich hier ebenso zwangsläufig eine Abweichung zwischen idealer Betrachtung und Simulationsbetrachtung.

#### 6.2.4. Orte höchster Schrittspannungen

##### Analytische Betrachtung

Wie bereits in Kapitel 6.1.2 geschrieben, haben die Flächen gleicher Stromdichte und gleichen Potentials das Bestreben, Halbkugelschalen im Boden auszubilden. Auf die Erdoberfläche bezogen – welche für die Betrachtung von Schrittspannungen alleine maßgeblich ist – bedeutet das, dass die Isopotentialflächen für große Radien hier zu Kreisen werden.

Vereinfachend sei außerdem angenommen, dass das Gebäude selbst auch eine Isopotentialfläche darstellt, da beispielsweise ein Fundament- oder Ringerder als Objekt in sich gleichen Potentials die Gebäudekontur nachzeichnet. Demnach entspricht diese Fläche – bei den hier hauptsächlich untersuchten Gebäudekonfigurationen – auf der Erdoberfläche einem Rechteck. Abbildung 6.15 verdeutlicht dies für den Sonderfall eines quadratischen Gebäudes.

Die maximale elektrische Durchschnittsfeldstärke  $\overline{E}$  ergibt sich daher allgemein über

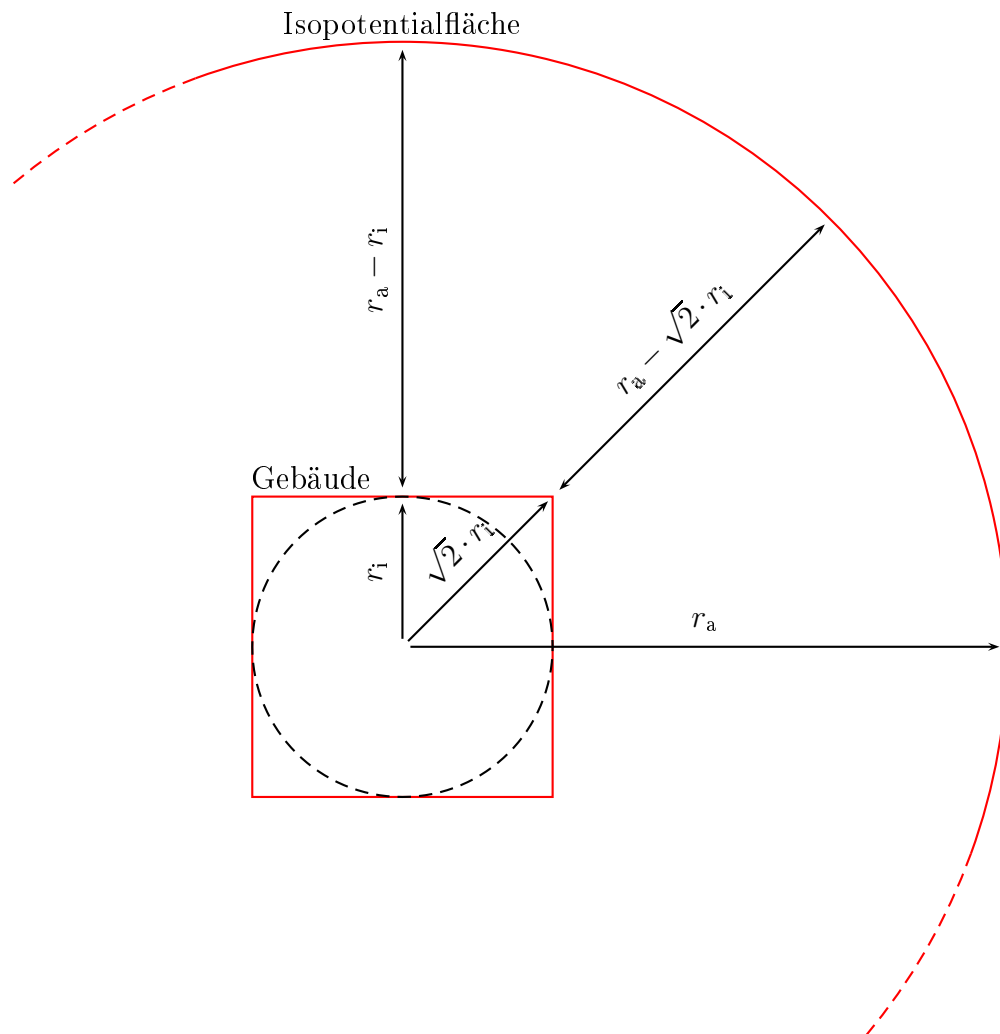
$$\max \overline{E} = \frac{\Phi(r_1) - \Phi(r_2)}{r_1 - r_2}, \quad (6.13)$$

das heißt, das maximale E-Feld liegt entlang einer Linie, die durch den Mittelpunkt der konzentrischen Isopotentialkreise geht. Legt man dabei die Linie so, dass sie eine Gebäudeseite mittig im  $90^\circ$ -Winkel schneidet, ergibt sich aus Abbildung 6.15:

$$\overline{E}_{90^\circ} = \frac{\Phi(r_a) - \Phi(r_i)}{r_a - r_i} \quad (6.14)$$

Für eine Linie, die durch eine Gebäudeecke geht und mit den Gebäudeseiten einen  $45^\circ$ -Winkel bildet, ergibt sich stattdessen:

$$\overline{E}_{45^\circ} = \frac{\Phi(r_a) - \Phi(r_i)}{r_a - \sqrt{2} \cdot r_i} \quad (6.15)$$



**Abbildung 6.15.:** Prinzipskizze zur analytischen Begründung der 45°-Auswertechsen. Isopotentiallinien auf der Erdoberfläche sind rot eingezeichnet.

Da in (6.14) und (6.15) die beiden Potentiale  $\Phi(r_a)$  und  $\Phi(r_i)$  auf Isopotentialen liegen und damit qua definitionem jeweils gleich groß sind, ergibt sich der Unterschied zwischen  $\overline{E}_{90^\circ}$  und  $\overline{E}_{45^\circ}$  nur aus den jeweiligen Divisoren. Hier gilt:

$$(r_a - \sqrt{2} \cdot r_i) < (r_a - r_i) \quad (6.16)$$

$$\Rightarrow \overline{E}_{45^\circ} > \overline{E}_{90^\circ} \quad (6.17)$$

Da auch keine weitere Richtung existiert, für die der Abstand zwischen den beiden eingezeichneten Isopotentialflächen noch geringer werden kann, liegt die höchste mittlere E-Feldstärke  $\overline{E}$  entlang einer Linie im  $45^\circ$ -Winkel aus einer Gebäudeecke heraus. Da außerdem wegen  $U = \int E \, ds$  gilt  $U_S \sim E$ , muss auch die höchste Schrittspannung auf dieser Linie liegen.

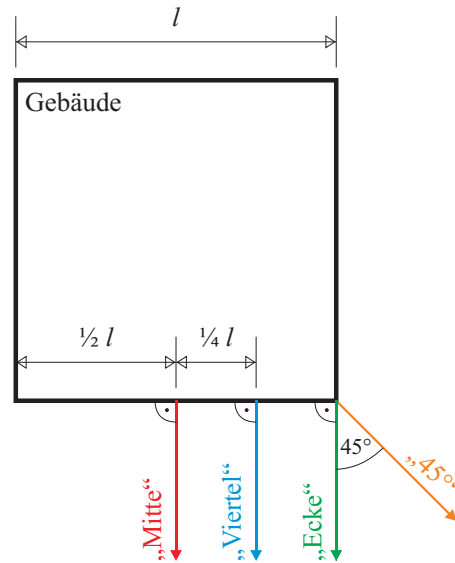
## Simulationen

Um auf einfache Weise auch bei anderen Erderformen und Gebäudegrundrissen den Ort der höchsten Schrittspannung zu finden und auch, um wahrscheinliche Kandidaten für diesen Ort gut miteinander vergleichen zu können, wurden exemplarisch einige Simulationen unter diesem Aspekt ausgewertet. Alle folgenden Ergebnisse basieren auf einem Blitzstrom von 100 kA und Bodenleitfähigkeiten entsprechend Kapitel 6.1.

**Gebäude mit quadratischem Grundriss** Als Beispiel für zu schützende Strukturen mit quadratischem Grundriss wurde die Gebäudegröße  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  gewählt. Insgesamt werden vier Pfade betrachtet, entlang derer die Schrittspannungen ausgewertet werden. Diese Pfade sind in Abbildung 6.16 dargestellt.

**Ringerder** Zunächst wird eine Erderkonfiguration mit vier Ringerdern sowie einem Fundamenteerder betrachtet, die entsprechenden Graphen sind in Abbildung 6.17 dargestellt.

Es fällt unmittelbar auf, dass die Ergebnisse der drei Pfade rechtwinklig zum Gebäude nahezu identisch sind. Lediglich die Schrittspannungen entlang des Pfades „Ecke“ sind geringfügig höher. Im Vergleich dazu weichen die Ergebnisse entlang des Pfades „ $45^\circ$ “ stark ab: Zunächst ist hier zu erkennen, dass die lokalen Maxima der Spannungswerte an anderen Positionen liegen. Der Grund hierfür sind die um den Faktor  $\sqrt{2}$  größeren Abstände der Erder zueinander auf dieser Achse. Zusätzlich sind hier jedoch auch die Schrittspannungen sowohl innerhalb als auch außerhalb der Erdungsanlage größer. Während die höheren Werte außerhalb der Anlage ( $r \approx 15 \text{ m}$ ) auf das Bestreben des elektrischen Strömungsfeldes, kreis- bzw. kugelförmige Äquipotentiallinien bzw. -flächen auszubilden (vgl. analytische Betrachtungen), zurückzuführen sind, liegt der Grund für die höheren Werte innerhalb der Anlage an einer schlechteren Potentialsteuerung aufgrund der größeren Abstände der Ringerder.



**Abbildung 6.16.:** Betrachtungspfade für Spannungen an einem quadratischen Gebäude (Draufsicht)

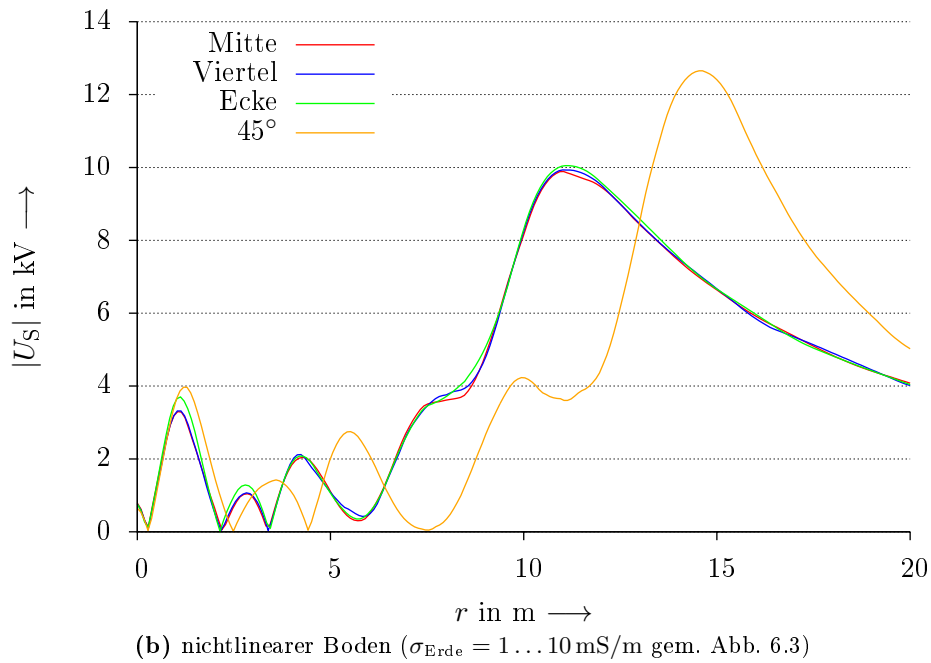
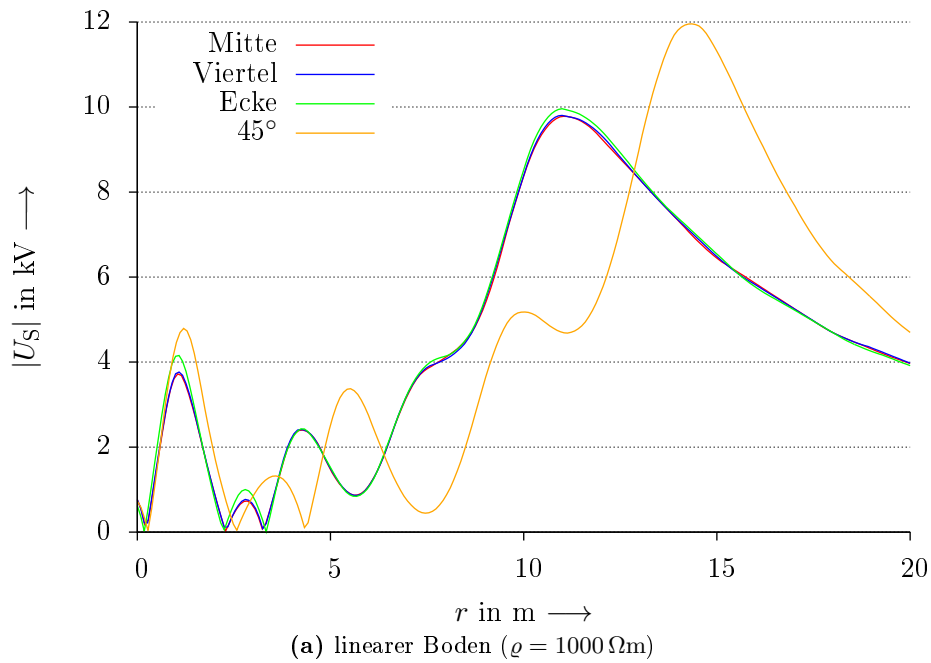
**Tiefenerder** Analog zur vorherigen Ringerder-Konfiguration wurde auch eine Erdungsanlage mit vier Tiefenerdern (oberes Ende des Tiefenerders bei  $h = -2\text{ m}$ , vgl. Abschnitt 7.1.3), hier mit einer Länge von  $9\text{ m}$ , betrachtet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.18 dargestellt.

Im Gegensatz zur Ringerder-Anlage weichen hier die Schrittspannungen entlang jedes Pfades jeweils deutlich voneinander ab. Daran, dass die Werte auf den Achsen „Mitte“ und „Viertel“ kleiner sind als auf den Achsen „Ecke“ und „45°“, ist zu erkennen, dass das Oberflächenpotential von den Gebäudeecken her zur jeweiligen Mitte der Wände abfällt. Entsprechend kleiner ist hier die Potentialdifferenz zur unendlich entfernten Erde und die Schrittspannungen fallen niedriger aus. Mit zunehmender Entfernung vom Gebäude (ab ca.  $6\text{ m}$ ) vergleichmäßigt sich die Potentialverteilung im Erdboden und die Schrittspannungswerte nähern sich wieder einander an.

Auch hier ist festzustellen, dass die höchsten Werte entlang des Pfades „45°“ auftreten.

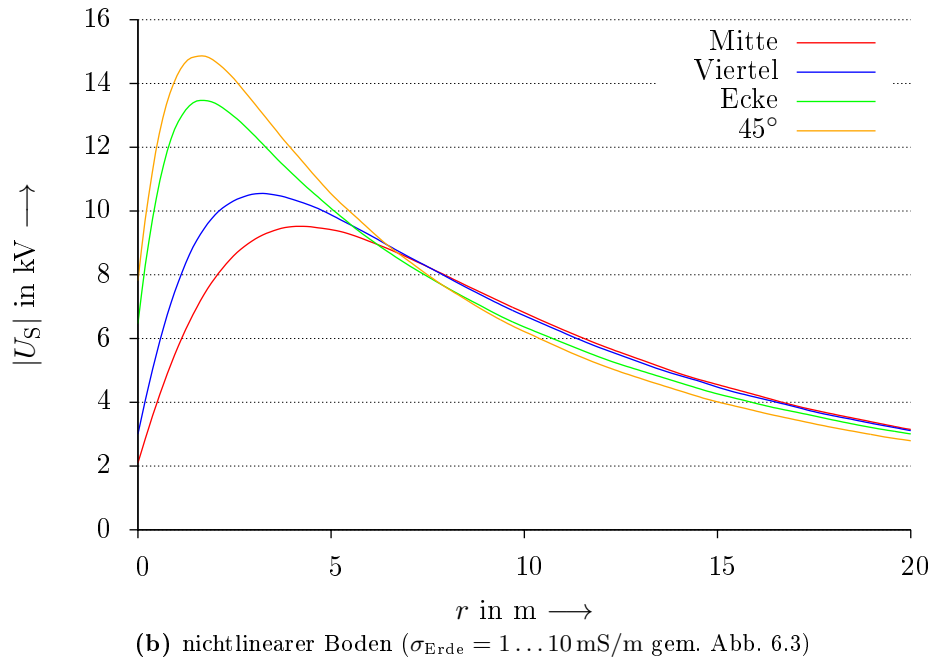
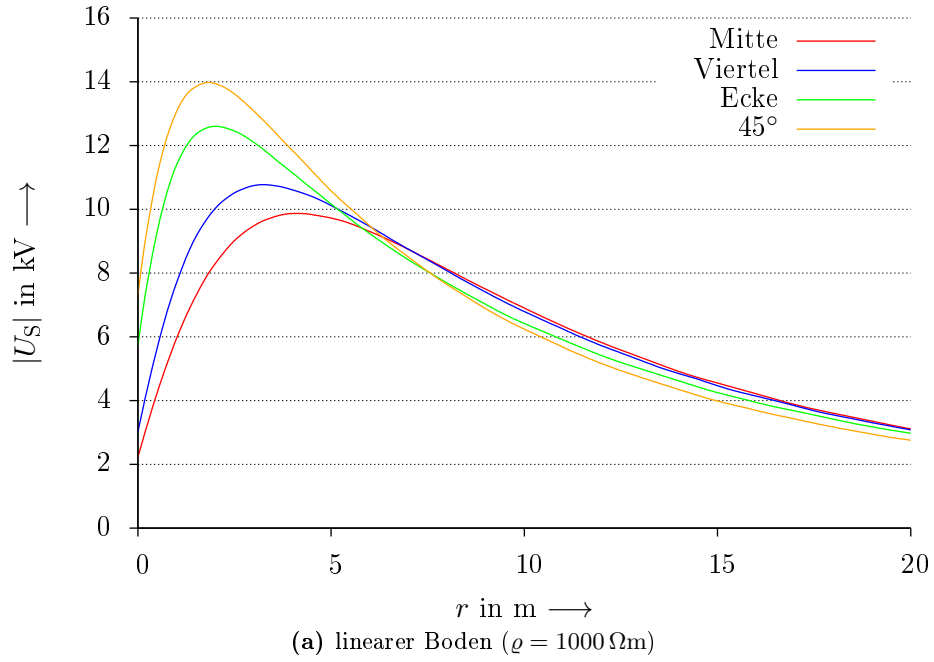
**Gebäude mit rechteckigem Grundriss** Stellvertretend für Gebäude mit rechteckigem Grundriss wurde die Gebäudegröße  $2\text{ m} \times 5\text{ m}$  gewählt. Im Vergleich zu Gebäuden mit quadratischem Grundriss werden zwei weitere Pfade betrachtet, entlang derer die Schrittspannungen ausgewertet werden. Alle Pfade sind in Abbildung 6.19 dargestellt.

**Ringerder** Für den Fall eines rechteckigen Gebäudes wurde ebenfalls zunächst die Erder-Konfiguration mit vier Ringerdern und einem Fundamenterder betrachtet. Die

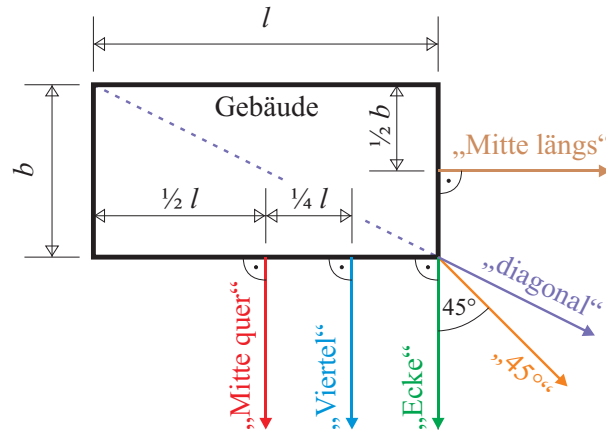


**Abbildung 6.17.:** Schrittspannungen entlang verschiedener Pfade an einem quadratischen Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  bei einer Vier-Ringerder-Anlage ( $I = 100 \text{ kA}$ )

## 6. Voruntersuchungen und Plausibilitätskontrolle des Simulationsmodells



**Abbildung 6.18.:** Schrittspannungen entlang verschiedener Pfade an einem quadratischen Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  bei vier 9-m-Tiefenerdern Typ d) ( $I = 100 \text{ kA}$ )



**Abbildung 6.19.:** Betrachtungspfade für Schrittspannungen an einem rechteckigen Gebäude (Draufsicht)

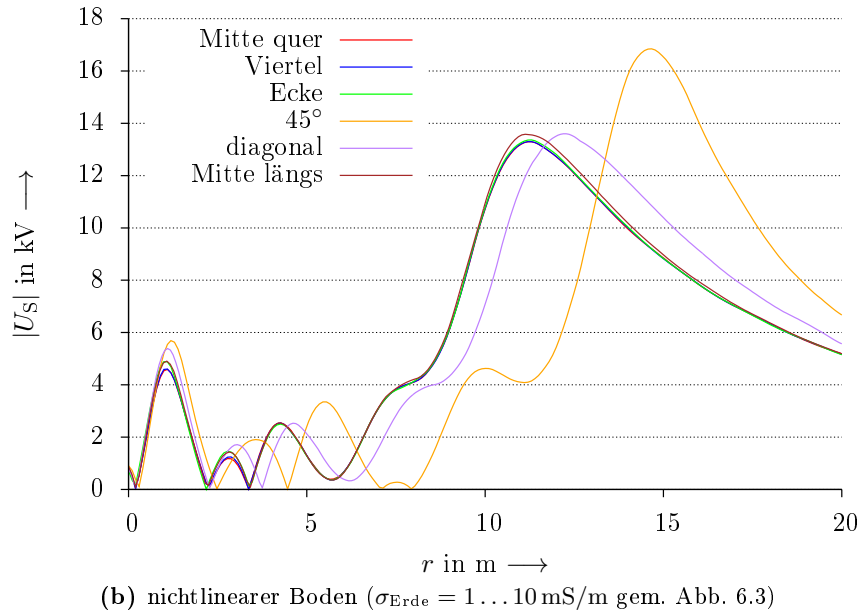
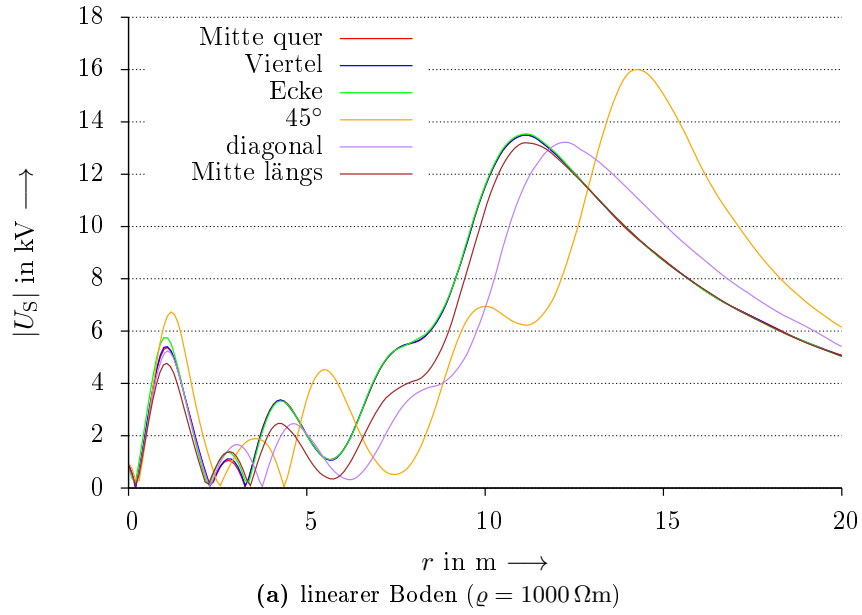
Ergebnisse sind in Abbildung 6.20 zu sehen.

Wie auch im Fall eines quadratischen Gebäudes ist hier zu erkennen, dass es entlang der „45°“-Achse zu einer Verschiebung der lokalen Maxima der Schrittspannungen gegenüber den rechtwinkligen Achsen kommt, sowie insgesamt höhere Werte zu beobachten sind. Die Spannungen entlang der „diagonal“-Achse zeigen zwar aus geometrischen Gründen ebenfalls eine leichte Verschiebung der Maximalwerte, jedoch treten hier lediglich Werte auf, die im Bereich der Schrittspannungen entlang der anderen Pfade liegen, teilweise sogar darunter.

**Tiefenerder** Auch hier wurden die Simulationsergebnisse für vier Tiefenerder mit einer Länge von jeweils 9 m analog zu Abschnitt 6.2.4 herangezogen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.21 dargestellt.

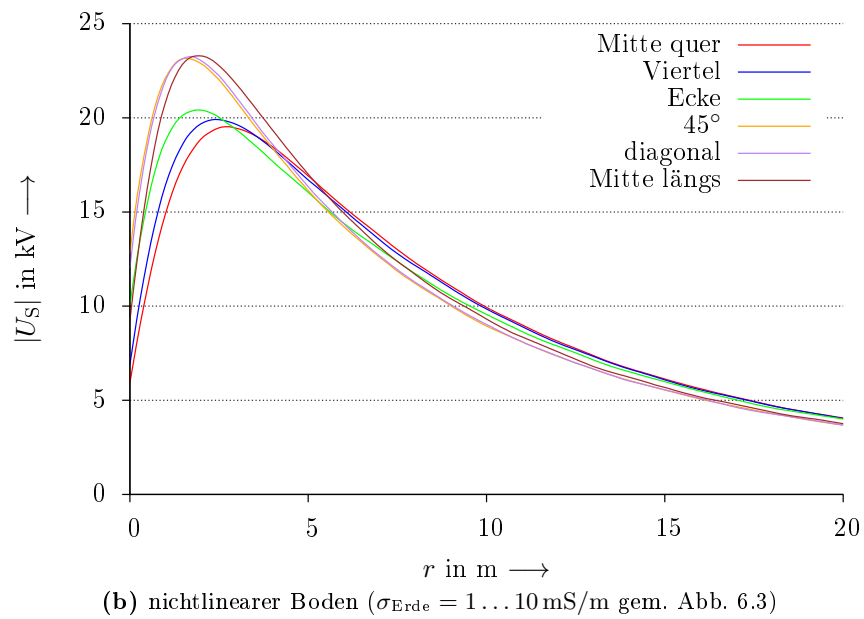
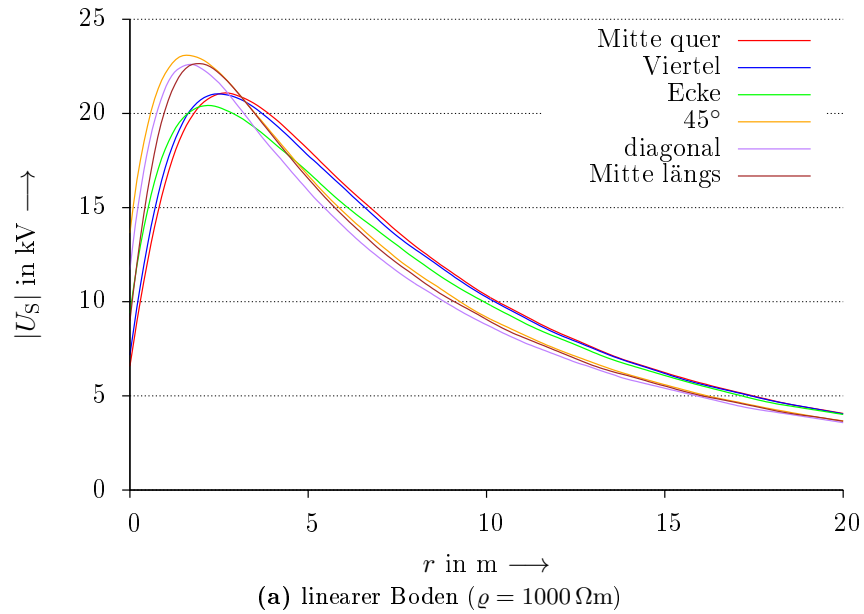
Hier ist ebenfalls zu beobachten, dass im Fall linearen Bodens die Werte entlang des „45°“-Pfades die höchsten der verglichenen Varianten sind. Im Fall nichtlinearen Bodens sind die Werte entlang des Pfades „Mitte längs“ zwar noch größer, jedoch mit so geringem Abstand, dass auch die Werte des „45°“-Pfades zu Vergleichen herangezogen werden können.

**Zusammenfassung der Ergebnisse** Bei fast allen in diesem Kapitel untersuchten Erder- und Gebäude-Konfigurationen hat sich gezeigt, dass die höchsten Schrittspannungen entlang einer Achse auftreten, die von der Ecke eines Gebäudes im  $45^\circ$ -Winkel zu den angrenzenden Wänden ausgeht. Die einzigen Ausnahmen stellt der Fall von Tieferenerdern an einem rechteckigen Gebäude dar: Hier liegen die Schrittspannungen entlang der vorgenannten  $45^\circ$ -Achse sehr dicht bei oder gleichauf mit weiteren möglichen Auswertachsen – jedoch nicht nennenswert darunter. Daher bildet die Auswertung entlang der  $45^\circ$ -Achse immer die höchsten Schrittspannungen ab und stellt somit den Worst Case dar, weswegen diese Auswertemethode für alle Simulationen in dieser Arbeit herangezogen wird.



**Abbildung 6.20.:** Schrittspannungen entlang verschiedener Pfade an einem quadratischen Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  bei einer Vier-Ringerder-Anlage ( $I = 100 \text{ kA}$ )





**Abbildung 6.21.:** Schrittspannungen entlang verschiedener Pfade an einem quadratischen Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  bei vier 9-m-Tiefenerdern Typ d) ( $I = 100 \text{ kA}$ )

### 6.2.5. Einfluss ungleichmäßiger Stromaufteilung

Schlägt ein Blitz in ein reales Blitzschutzsystem ein, teilt sich der Blitzstrom in ungünstigen Fällen nicht gleichmäßig auf alle vorhandenen Ableitungen und Erder auf. Diese ungleichmäßige Aufteilung wird in der DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3) durch den sogenannten  $k_C$ -Faktor berücksichtigt. Dabei ist die Stromaufteilung auf die Erder umso ungleichmäßiger,

- je weiter entfernt der Blitzeinschlag von der Mitte des Gebäudegrundrisses stattfindet,
- je größer das Gebäude in Bezug auf Länge und Breite ist und
- je niedriger das Gebäude ist<sup>9</sup>.

Bei allen in Kapitel 7.1 und 7.2 vorgestellten Simulationen sind die Erder hochleitfähig miteinander verbunden, sodass sich eine gleichmäßige Stromaufteilung auf die Erder einstellen kann. Um den Einfluss einer ungleichmäßigen Stromaufteilung zu untersuchen, wurde folgende Simulation durchgeführt: Von einem Gebäude der Größe  $10\text{ m} \times 50\text{ m}$  werde angenommen, dass es 5 m über der Erdoberfläche hoch sei und dass es mit 6 m langen Tiefenerdern ab Kellerniveau (vgl. Kapitel 7.1.3) versehen sei. Angenommen wurde weiterhin ein Blitzeinschlag unmittelbar in eine der Gebäudeecken.

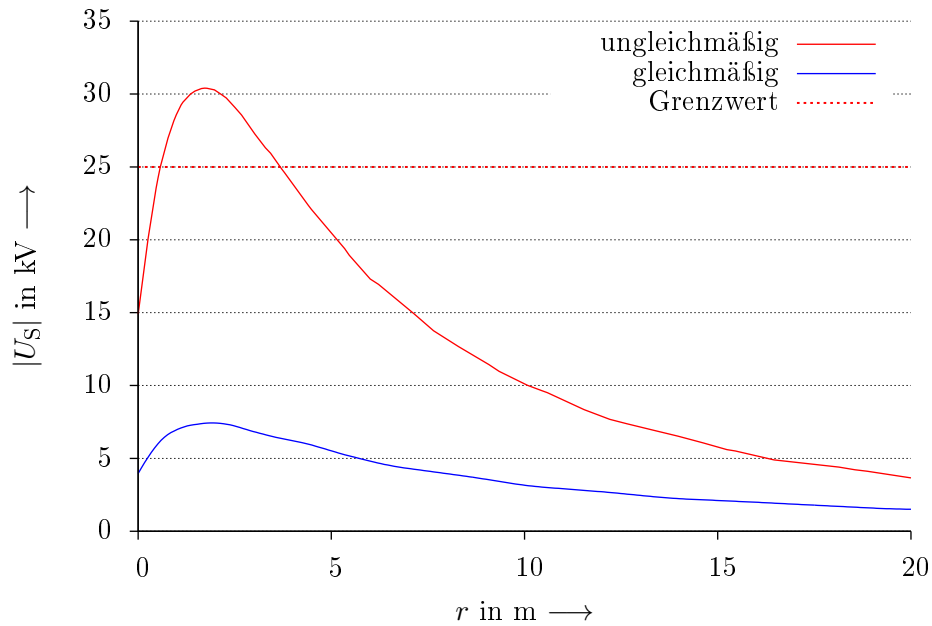
Mit Hilfe der kommerziellen Software „*DEHN Distance Tool*“ wurde unter Berücksichtigung dieser Annahmen für den dem Einschlagspunkt nächsten Erder ein Faktor von  $k_C = 0,51$  berechnet. Das bedeutet, dass 51 % des gesamten Blitzstromes über diesen Erder fließen. Da die Berechnungssoftware keine Angaben über die übrige Stromverteilung macht, wurde vom ungünstigsten Fall, nämlich der Aufteilung von je 24,5 % auf die beiden unmittelbar benachbarten Erder ausgegangen. Das Ergebnis ist für  $I = 100\text{ kA}$  und linearen Boden in Abbildung 6.22 zu sehen, wobei hier die Auswerteachse (vgl. Kapitel 6.1.4 und 6.2.4) an diejenige Gebäudeecke gelegt wurde, an welcher der angenommene Blitzeinschlag stattfand.

Wie leicht zu erkennen ist, bewirkt die ungleichmäßige Stromaufteilung in diesem Fall einen deutlichen Unterschied in den Schrittspannungen an der vom Blitzeinschlag betroffenen Gebäudeecke. Alle in den folgenden Kapiteln gezeigten Ergebnisse haben somit nur dann Gültigkeit, wenn durch geeignete Maßnahmen (wie Querverbindungen zwischen Ableitungen) sichergestellt ist, dass es zu einer gleichmäßigen Stromaufteilung auf alle Erder kommt. Ist dies nicht der Fall, bedarf es einer Einzelfall-Untersuchung, welche die individuellen Stromaufteilungen berücksichtigt.

Bezüglich der Stromaufteilung im Allgemeinen bleibt noch anzumerken, dass in der Realität die Blitzschutz-Erdungsanlage nur in den wenigsten Fällen mit dem vollen Blitzstrom belastet wird. In der Regel wird ein Teil des Blitzstromes über die

---

<sup>9</sup>Die Norm empfiehlt horizontale Querverbindungen zwischen den Ableitungen. Durch mehr Querverbindungen bei höheren Gebäuden ist eine gleichmäßige Stromaufteilung besser gewährleistet.



**Abbildung 6.22.:** Einfluss von gleichmäßiger und ungleichmäßiger Stromaufteilung auf mehrere Tiefenerder an einem Gebäude 10 m × 50 m. Nähere Erläuterungen siehe Haupttext.

Haupterdungsschiene<sup>10</sup> und daran angeschlossene Versorgungsleitungen (Strom, Gas, Wasser usw.) abfließen.

#### 6.2.6. Parameterstudie

Sollen die in den folgenden Kapiteln 7.1 und 7.2 untersuchten Erdungsanlagen praktisch umgesetzt werden, ergibt sich das Problem einer gewissen Ungenauigkeit: Beispielsweise ist davon auszugehen, dass der Erdboden – im Gegensatz zur Simulation – keine homogene Leitfähigkeit aufweist und dessen Messung zudem einer Messunsicherheit unterliegt. Ähnliches gilt für die Positionierung der Erdungsleiter im Boden: Auch hier können leicht Abweichungen von den Soll-Maßen auftreten. Daher werden in diesem Kapitel einige Untersuchungen darüber durchgeführt, wie stark sich Abweichungen in den Ausgangsbedingungen auf die resultierenden Schrittspannungen auswirken.

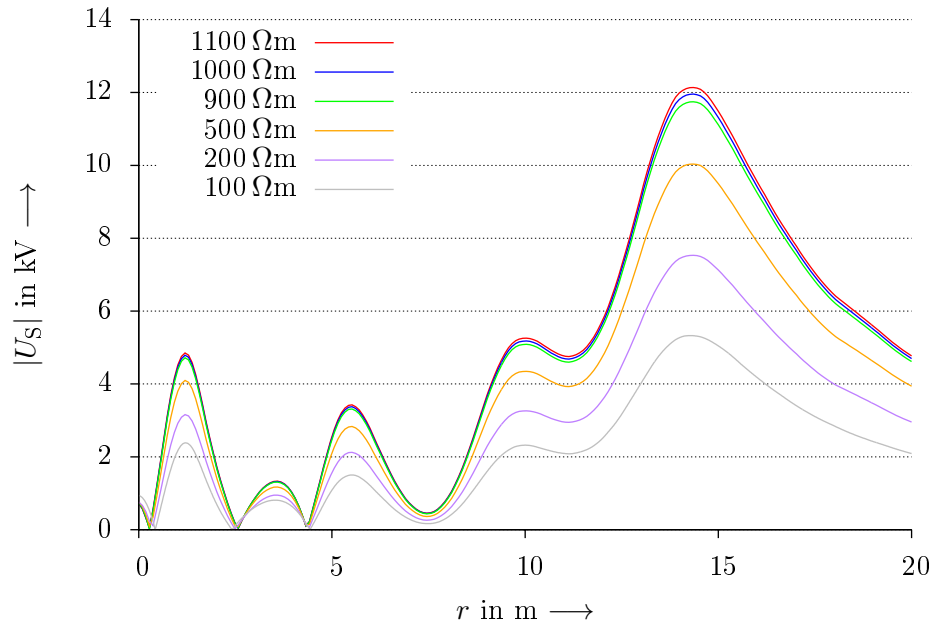
#### Bodenleitfähigkeit

Zur Untersuchung der Auswirkung von Schwankungen der Bodenleitfähigkeit  $\varrho_{\text{Erde}}$  auf die resultierende Schrittspannung wurde die Bodenleitfähigkeit um  $\pm 10\%$  variiert, die Simulation also mit  $\varrho_{\text{Erde}} = 900 \Omega\text{m}$  und  $\varrho_{\text{Erde}} = 1100 \Omega\text{m}$  statt der in Kapi-

<sup>10</sup>früher „Hauptpotentialausgleich“, vgl. DIN VDE 0100-410

## 6. Voruntersuchungen und Plausibilitätskontrolle des Simulationsmodells

tel 6.1.3 festgelegten  $\varrho_{\text{Erde}} = 1000 \Omega\text{m}$  durchgeführt. Als Anwendungsbeispiel wurde ein Gebäude von  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  mit Fundamenterder und vier Ringerdern gemäß VDE-Vorgaben (vgl. Kapitel 7.1.2) verwendet. Das Ergebnis ist – für einen Blitzstrom von  $100\text{ kA}$  – in Abbildung 6.23 zu sehen, wobei hier zusätzlich auch noch die Schrittspannungen für  $\varrho_{\text{Erde}} = 100 \Omega\text{m}$ ,  $\varrho_{\text{Erde}} = 200 \Omega\text{m}$  und  $\varrho_{\text{Erde}} = 500 \Omega\text{m}$  eingetragen sind.



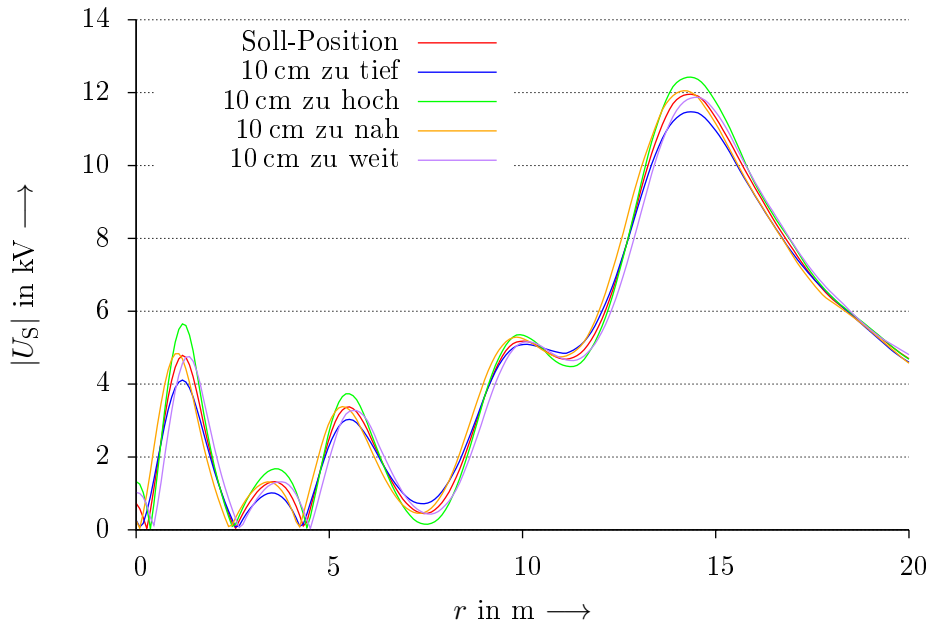
**Abbildung 6.23.:** Schrittspannungen in Abhängigkeit des spezifischen Bodenwiderstandes  $\varrho_{\text{Erde}}$  an einer Vier-Ringerder-Anlage gemäß VDE um ein Gebäude  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  und  $I = 100\text{ kA}$

Wie leicht zu erkennen ist, sinken mit abnehmendem spezifischen Bodenwiderstand die resultierenden Schrittspannungen, jedoch stark unterproportional: Eine Veränderung des Bodenwiderstandes von  $\pm 10\%$  um  $\varrho_{\text{Erde}} = 1000 \Omega\text{m}$  führt lediglich zu einer Änderung der Schrittspannungen im Bereich von 1 %.

### Erderposition

Ebenfalls wurde untersucht, wie stark sich die resultierenden Schrittspannungen verändern, wenn die vorgesehene Positionierung der Erdungsleiter im Erdboden (Verlegetiefe und Abstand) nicht eingehalten werden. Auch hierzu wurde als Ausgangsmodell die Kombination aus vier Ringerdern gemäß VDE mit einem Fundamenterder um ein Gebäude von  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  gewählt. Abweichend von den Soll-Vorgaben zur Verlegung wurden die Erderringe jeweils um  $10\text{ cm}$  zu hoch, zu tief, zu nah am Gebäude und zu weit entfernt vom Gebäude platziert. Dabei wurde jeder einzelne Erderring für sich um  $10\text{ cm}$  verschoben, das heißt, die Position der Erderringe relativ zueinan-

der bleibt stets gleich, es wurde nur der Abstand zum Gebäude beziehungsweise der Erdoberfläche verändert. Die Ergebnisse sind für  $I = 100\text{ kA}$  in Abbildung 6.24 zu sehen.



**Abbildung 6.24.:** Schrittspannungen bei Abweichungen der Verlegepositionen der Ringerder von den Soll-Vorgaben an einer Vier-Ringerder-Anlage gemäß VDE um ein Gebäude  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  und  $I = 100\text{ kA}$ . ( $\varrho_{\text{Erde}} = 1000\ \Omega\text{m}$ )

Wie zu erkennen ist, ergeben sich bei Verschiebung der Erderpositionen vom Sollwert Abweichungen in den resultierenden Schrittspannungen, die ungefähr proportional zur relativen Abweichung des nächstgelegenen Ringerders sind. Beispiele:

- $\pm 10\text{ cm}$  Höhenunterschied am innersten Ringerder entspricht einer relativen Änderung von  $10\text{ cm}/50\text{ cm} = 20\%$ . Die resultierende Schwankung der Schrittspannungen bei  $r \approx 1,2\text{ m}$  beträgt etwa  $5,6\text{ kV}/4,7\text{ kV} - 1 \approx 19\%$
- $\pm 10\text{ cm}$  Höhenunterschied am äußersten Ringerder entspricht einer relativen Änderung von  $10\text{ cm}/200\text{ cm} = 5\%$ . Die resultierende Schwankung der Schrittspannungen bei  $r \approx 14,3\text{ m}$  beträgt etwa  $12,4\text{ kV}/11,9\text{ kV} - 1 \approx 4\%$

Vor diesem Hintergrund ist bei einer praktischen Umsetzung einer Erderanlage dazu zu raten, die Erdungsleiter eher zu tief als zu hoch im Vergleich zur Soll-Vorgabe zu verlegen. Dies wird u. a. auch durch die Ergebnisse in Kapitel 7.2.1 deutlich.

Im Vergleich dazu verschieben sich bei einer Abweichung der Erderposition in horizontaler Richtung die lokalen Minima und Maxima der Schrittspannung lediglich um die selbe Distanz wie die Erder, die Höhe der Schrittspannungen verändert sich dagegen nur leicht.

### 6.3. Validierung des Simulationsmodells

Um sicherzustellen, dass die Simulationsmodelle in sich korrekte Ergebnisse liefern, wurden die Ergebnisse von *COMSOL* mit zwei unterschiedlichen Methoden an ausgewählten Beispielen untersucht:

- Analytische Betrachtung
- Kontrolle mit einer zweiten Simulationssoftware

Beide Ansätze werden im Folgenden kurz vorgestellt.

#### 6.3.1. Analytische Überprüfung

Als Anwendungsbeispiel für die analytische Überprüfung wurde ein Halbkugelerder mit einem Radius von  $r_K = 1\text{ m}$  gewählt, da sich dieser mathematisch besonders einfach behandeln lässt. Das Berechnungsgebiet der Simulation besteht, wie in Abschnitt 6.1.2 beschrieben, ebenfalls aus einer Halbkugel mit  $r_a = 100\text{ m}$ . Der Boden ist als linear mit  $\sigma = 0,001\text{ S/m}$  angenommen.

Ganz allgemein gilt hier zunächst für das Verhältnis zwischen elektrischer Stromdichte  $J$  in einer Hüllfläche  $A$  und dem insgesamt eingeprägten Strom  $I$ :

$$\oint_A \vec{J} d\vec{A} = 0 \quad (6.18)$$

Im vorliegenden Fall des Halbkugelerders ist die Hüllfläche eine Halbkugelschale mit Radius  $\xi$ , wodurch sich das Integral (6.18) nach Umstellen zu

$$J(\xi) = \frac{I}{2\pi\xi^2} \quad (6.19)$$

vereinfacht. Daraus folgt bei gegebener, homogener spezifischer Leitfähigkeit  $\sigma$  die elektrische Feldstärke

$$E(\xi) = \frac{I}{2\pi\sigma} \cdot \frac{1}{\xi^2}. \quad (6.20)$$

Durch Integration wird daraus das elektrische Potential  $\Phi$  bestimmt:

$$\Phi(r) = \int E(\xi) d\xi \quad (6.21)$$

Da hier von einer idealen, unendlich weit entfernten Erde ausgegangen wird, gilt somit:

$$\Phi(r) = \int_r^\infty E(\xi) d\xi \quad (6.22)$$

$$\begin{aligned} &= \int_r^\infty \frac{I}{2\pi\sigma} \cdot \frac{1}{\xi^2} d\xi \\ &= \frac{I}{2\pi\sigma} \int_r^\infty \frac{1}{\xi^2} d\xi \\ &= \frac{I}{2\pi\sigma} \left[ -\frac{1}{\xi} \right]_r^\infty \\ \Phi(r) &= \frac{I}{2\pi\sigma} \left( \frac{1}{\infty} - \frac{1}{r} \right) \end{aligned} \quad (6.23)$$

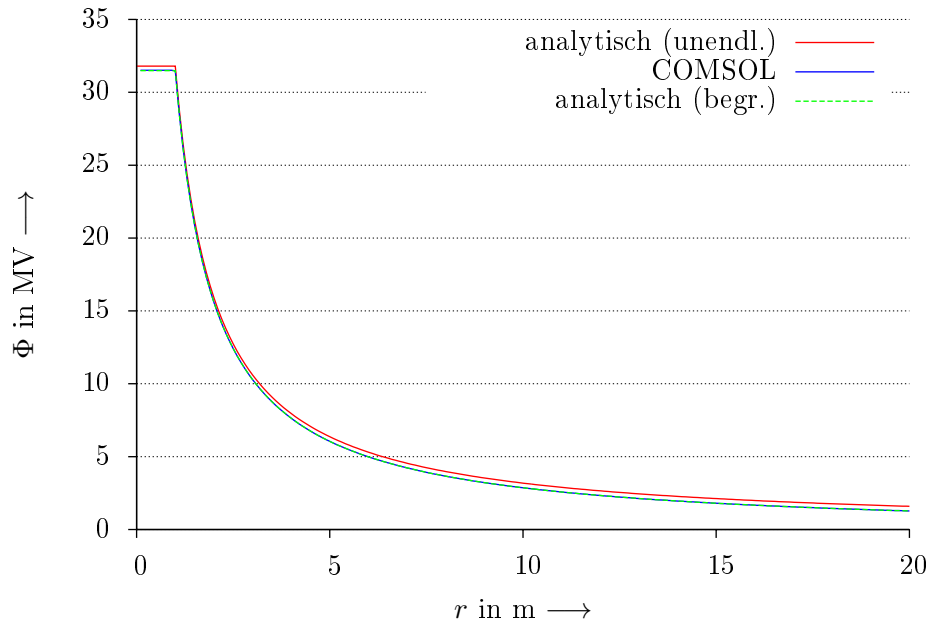
Der Term  $\frac{1}{\infty}$  wird dabei zu 0, daher gilt für  $\Phi(r)$  schließlich:

$$\Phi(r) = -\frac{I}{2\pi\sigma} \cdot \frac{1}{r} \quad (6.24)$$

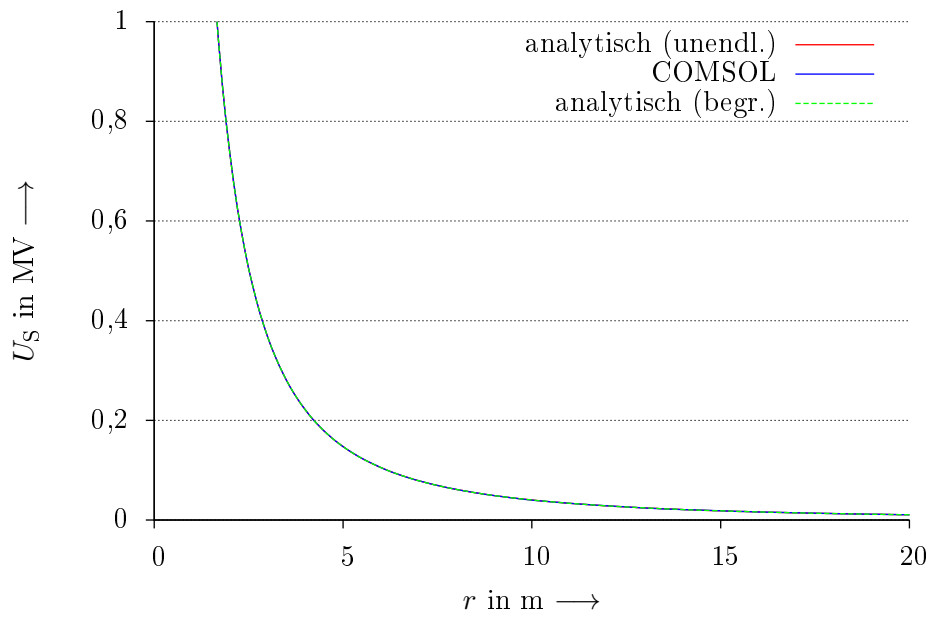
Diese Funktion ist zusammen mit den Simulationsergebnissen aus *COMSOL* unter der Bezeichnung „analytisch (unendl.)“ in Abbildung 6.25 aufgetragen. Wie dabei zu erkennen ist, sind beim Oberflächenpotential noch Abweichungen zwischen der analytischen Berechnung und der Simulation vorhanden.

Der Grund hierfür liegt in einem prinzipiellen Unterschied zwischen der Simulation und der obigen analytischen Betrachtung: In der Simulation befindet sich die „ideale Erde“ nicht in einem unendlichen Abstand, sondern am Rand des endlichen Simulationsgebiets. Zur analytischen Kontrolle der Simulation unter diesen Randbedingungen kann zunächst der obige Ansatz bis einschließlich Gleichung (6.21) verwendet werden. Bei den Integrationsgrenzen muss jetzt jedoch  $\infty$  durch den Radius des Simulationsgebiets  $r_a$  (hier 100 m) ersetzt werden:

6. Voruntersuchungen und Plausibilitätskontrolle des Simulationsmodells



(a) Potential auf der Erdoberfläche



(b) Schrittspannung

**Abbildung 6.25.:** Vergleich von Simulation und analytischen Berechnungen an einem Halbkugelerder mit  $r_K = 1$  m. ( $I = 200$  kA,  $\varrho = 1000 \Omega\text{m}$ )



$$\Phi(r) = \int_r^{r_a} E(\xi) d\xi \quad (6.25)$$

$$\begin{aligned} &= \int_r^{r_a} \frac{I}{2\pi\sigma} \cdot \frac{1}{\xi^2} d\xi \\ &= \frac{I}{2\pi\sigma} \int_r^{r_a} \frac{1}{\xi^2} d\xi \\ &= \frac{I}{2\pi\sigma} \left[ -\frac{1}{\xi} \right]_r^{r_a} \\ \Phi(r) &= \frac{I}{2\pi\sigma} \left( \frac{1}{r_a} - \frac{1}{r} \right) \end{aligned} \quad (6.26)$$

Der Graph der Gleichung (6.26) ist ebenfalls in Abbildung 6.25 aufgetragen („analytisch (begr.)“) und zeigt sowohl beim Oberflächenpotential als auch bei der Schrittspannung eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der *COMSOL*-Simulation. Bezüglich der Schrittspannung ist zudem bemerkenswert, dass hier alle drei Ergebnisse eine sehr gute Übereinstimmung zeigen. Siehe hierzu auch Kapitel 6.2.3 zum Einfluss der Größe des Simulationsgebietes auf die Ergebnisse.

### 6.3.2. Überprüfung mit einer zweiten Simulationssoftware

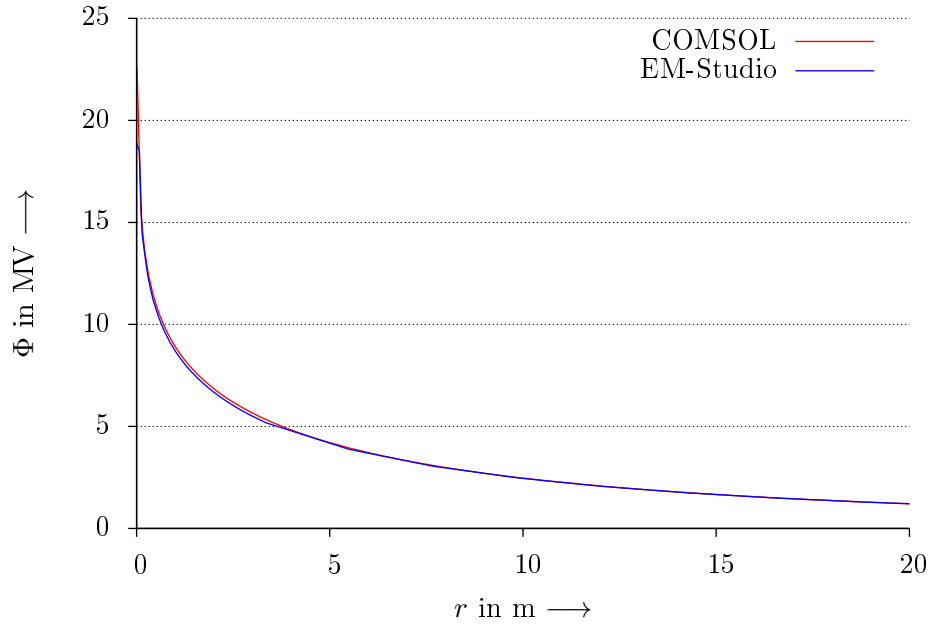
Zur Überprüfung der *COMSOL*-Simulationen mit einer weiteren Software wurde *EM Studio* der Firma *CST* gewählt. *EM Studio* unterscheidet sich dabei in seiner Arbeitsweise in zwei wesentlichen Punkten von *COMSOL*:

- *COMSOL* verwendet zur Diskretisierung grundsätzlich tetraedrische Gitterzellen, in *EM Studio* wurden für die vorliegenden Simulationen hingegen kubische Zellen verwendet.
- *COMSOL* verwendet zur Berechnung die Finite-Differenzen-Methode, während *EM Studio* nach der Finite-Integrations-Methode arbeitet.

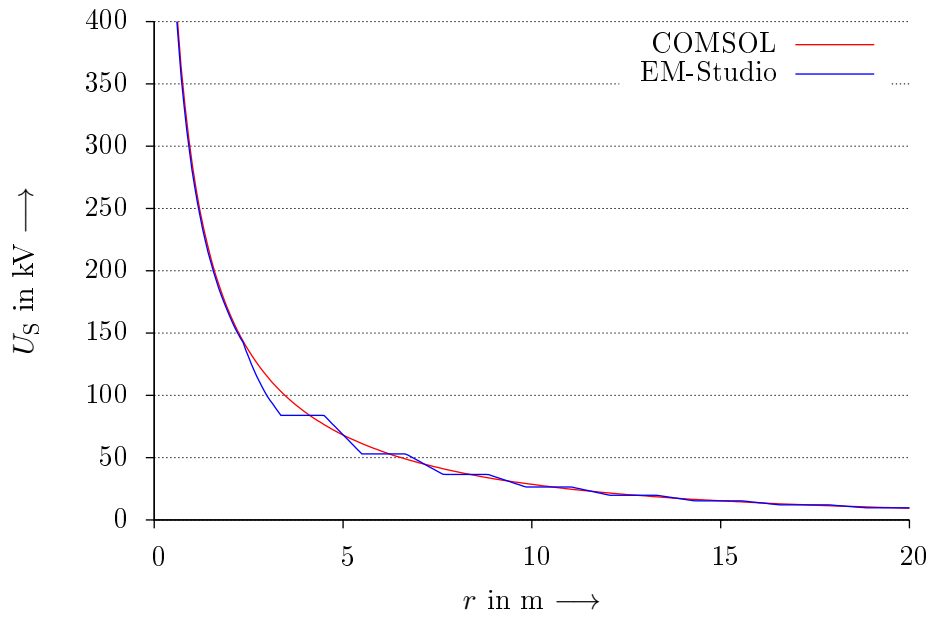
Durch diese Unterschiede ist gewährleistet, dass beide Softwarepakete ausreichend unabhängig voneinander arbeiten, um eine echte gegenseitige Überprüfung zu bieten.

Als Anwendungsbeispiel wurde in diesem Fall ein einzelner Staberder mit  $l = 10$  m und  $\varnothing = 2$  cm verwendet. Die übrigen Eigenschaften des Simulationsgebietes sind identisch mit denjenigen im vorherigen Abschnitt 6.3.1.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.26 zu sehen. Auch hier ist grundsätzlich eine gute Übereinstimmung zwischen den Simulationsergebnissen von *COMSOL* und *EM Studio* zu erkennen. Die Stufen im Verlauf des Ergebnisses von *EM Studio*, speziell bei der Schrittspannung im Bereich von etwa  $4 \text{ m} \leq r \leq 15 \text{ m}$  sind dabei auf das



(a) Potential auf der Erdoberfläche



(b) Schrittspannung

**Abbildung 6.26.:** Vergleich zweier unterschiedlicher Simulationen eines Staberders von 10 m Länge und 2 cm Durchmesser. ( $I = 200$  kA,  $\varrho = 1000 \Omega\text{m}$ )

Diskretisierungsverfahren („*Meshing*“) in *EM Studio* zurückzuführen: Die hier verwendeten kubischen Diskretisierungszellen erlauben keine „gleitende“ Vergrößerung der Zellen, wie dies bei tetraedrischen Zellen möglich ist. Daher war für einen akzeptablen Kompromiss aus Simulationsgenauigkeit und Rechenzeit in diesem Bereich ein Diskretisierungsgitter notwendig, das etwas zu grob für das gegebene Problem war. Durch das zu grobe Gitter ergeben sich die stufigen Verläufe. Trotz dieser lokalen Abweichungen ergibt sich im Mittel dennoch eine gute Übereinstimmung mit den *COMSOL*-Ergebnissen.

Somit kann zusammenfassend gesagt werden, dass beide Überprüfungsmethoden die Ergebnisse der *COMSOL*-Simulationen bestätigt haben und somit davon auszugehen ist, dass die *COMSOL*-Modelle grundsätzlich korrekte Lösungen liefern.



## 7. Simulation von Erdungsanlagen

**Zusammenfassung:** *In diesem Kapitel werden die eigentlichen Simulationsergebnisse von Erdungsanlagen vorgestellt. Dabei werden zunächst „konventionelle“ Erdungskonzepte, also in den einschlägigen Normen beschriebene und derzeit hauptsächlich errichtete Erdungsanlagen, untersucht. Danach werden die Simulationen auf „nichtkonventionelle“, also neuartige Erdungskonzepte ausgedehnt.*

### 7.1. Konventionelle Erdungskonzepte

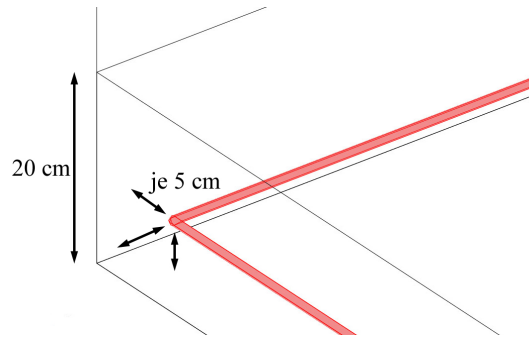
In diesem Abschnitt werden zunächst die Untersuchungsergebnisse von konventionellen Erderanordnungen wie Ringerder und Staberder vorgestellt. Die einzelnen Ergebnisse werden dabei eher punktuell diskutiert, eine Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse und die Ableitung von Regeln daraus folgt in Kapitel 8. Bei allen Graphen ist zudem als Referenz der in Kapitel 5.5 eingeführte Schrittspannungsgrenzwert mit eingezeichnet.

Die Ergebnisse werden zudem in diesem Kapitel soweit möglich lediglich in einer zusammengefassten Darstellung gezeigt, alle Einzelergebnisse – also mit allen Variationen der Gebäudegröße und der Stromstärke – sind in Anhang B.2 zu finden.

#### 7.1.1. Fundamenterder

Ein Fundamenterder stellt die einfachste Form eines Blitzschutzerders dar. Zur Simulation in *COMSOL* wurde zunächst eine Bodenplatte in den Gebäuden modelliert, die jeweils eine Dicke von 20 cm aufweist. Der Beton wurde dabei mit einem spezifischen Widerstand von  $\varrho = 300 \Omega\text{m}$  angenommen (vgl. Tabelle 6.2). In diese Bodenplatte wurde ein umlaufender Fundamenterder so eingebracht, dass sein Mittenabstand zu den Gebäudewänden und zur Unterkante der Bodenplatte jeweils 5 cm betrug. Der Fundamenterder selbst besteht dabei aus Rundmaterial mit einem Radius von 1 cm. Die Ecken sind kugelförmig mit ebenfalls  $r = 1 \text{ cm}$  verrundet. Abbildung 7.1 zeigt eine Skizze der Anordnung.

Die Ergebnisse für einen Blitzstrom von 200 kA, entsprechend Blitzschutz-Gefährdungspegel I, sind in Abbildung 7.2 zu sehen. Dabei ist unmittelbar zu erkennen, dass mit einem Fundamenterder alleine der Schrittspannungs-Grenzwert bei  $I = 200 \text{ kA}$  in fast allen Fällen weit überschritten wird. Lediglich bei einer Gebäudegröße von  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m}$  liegen die maximal auftretenden Schrittspannungen zumindest in der



**Abbildung 7.1.:** Skizze zur Modellierung eines Fundamenterders (rot eingefärbt) sowie einer Fundamentplatte in *COMSOL*

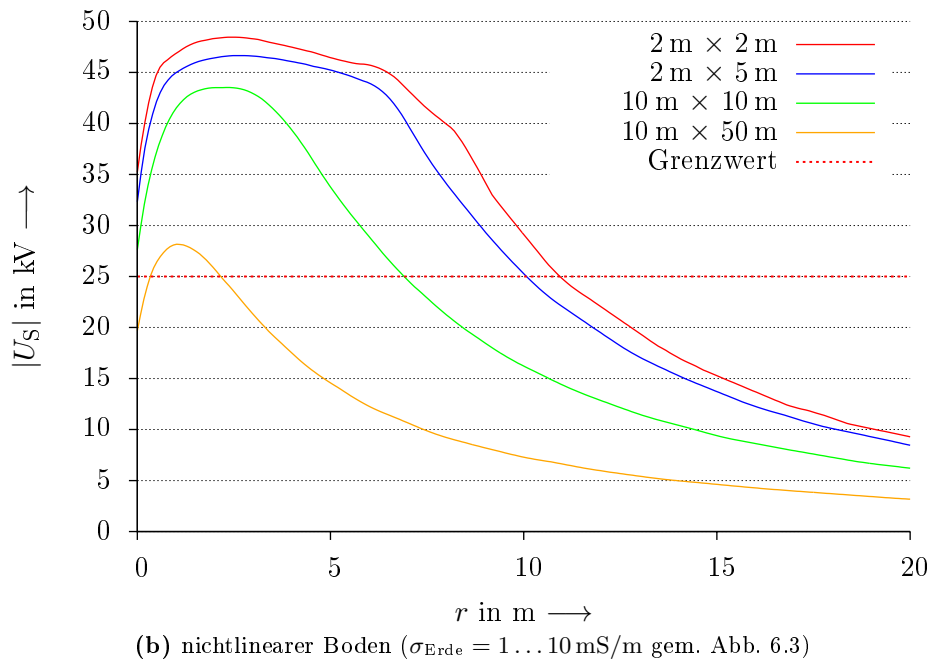
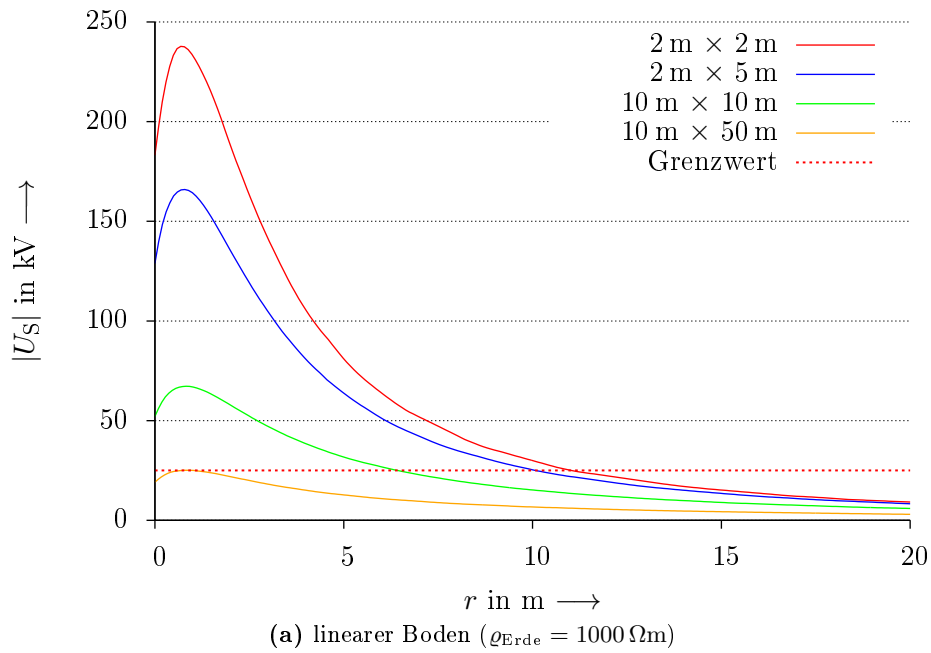
Nähe des Grenzwertes. Die Verhältnisse für weitere Blitzströme können in den Abbildungen B.7–B.10 abgelesen werden.

Darüber hinaus lässt sich für den Fall des nichtlinearen Bodens am „Plateau“ in den Graphen sehr gut die Ausdehnung der Ionisationszone erkennen.

### 7.1.2. Ringerder gemäß VDE 0185-305

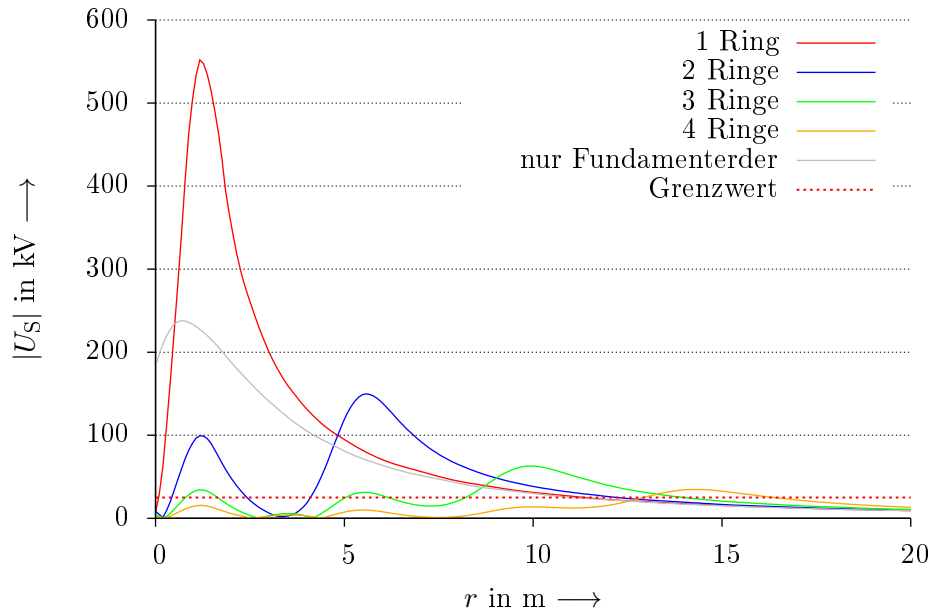
Für die Untersuchung von Ringerdern wurde, wie häufig praktisch ausgeführt, der im vorherigen Abschnitt vorgestellte Fundamenterder beibehalten. Zusätzlich dazu wurden die Modelle um einen bis vier Ringerder um das Gebäude ergänzt. Der geometrisch-mechanische Aufbau der einzelnen Ringe ist dabei mit dem des Fundamenterders vergleichbar. Die Platzierung sowohl in Bezug auf den Abstand zum Gebäude als auch in Bezug auf die Verlegetiefe entsprechen dabei der Vorgabe aus DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3) (vgl. dazu auch Abbildung 3.2), wobei ein einzelner Ring immer an der innersten dort definierten Position lag, zwei Ringerder an den innersten beiden Positionen und so weiter. Die Leiter aller Ringe verliefen dabei stets parallel zur nächsten Gebäudewand und waren untereinander leitfähig verbunden.

Die Ergebnisse für  $I = 200 \text{ kA}$  sind in den Abbildungen 7.3–7.6 dargestellt, wobei zum Vergleich zusätzlich nochmals die Schrittspannungsverläufe für einen Fundamenterder alleine enthalten sind. Sämtliche weiteren Ergebnisse für andere Stromstärken sind in den Abbildungen B.11–B.26 (Seite 186–201) zu sehen. Dabei ist unmittelbar augenfällig, dass die Schrittspannungen bei der Verwendung der Kombination eines einzelnen Ringerders und eines Fundamenterders über den Schrittspannungswerten bei der Verwendung eines Fundamenterders alleine liegen. (Zur näheren Begründung siehe Kapitel 8.) Dies ist insofern bemerkenswert, als dass die aktuelle DIN EN 62305-3 einen Fundamenterder *oder* einen einzelnen Ringerder (wobei bei einem einzelnen Ringerder ohne Fundamenterder noch höhere Schrittspannungen zu erwarten sind als bei der Kombination aus beiden) als gleichwertige Lösungen für Erder „Typ B“ ansieht (vgl. Kapitel 3.2.1). Erst durch das Hinzufügen eines zweiten oder in manchen Fällen sogar dritten Ringerders fallen die resultierenden Schritt-

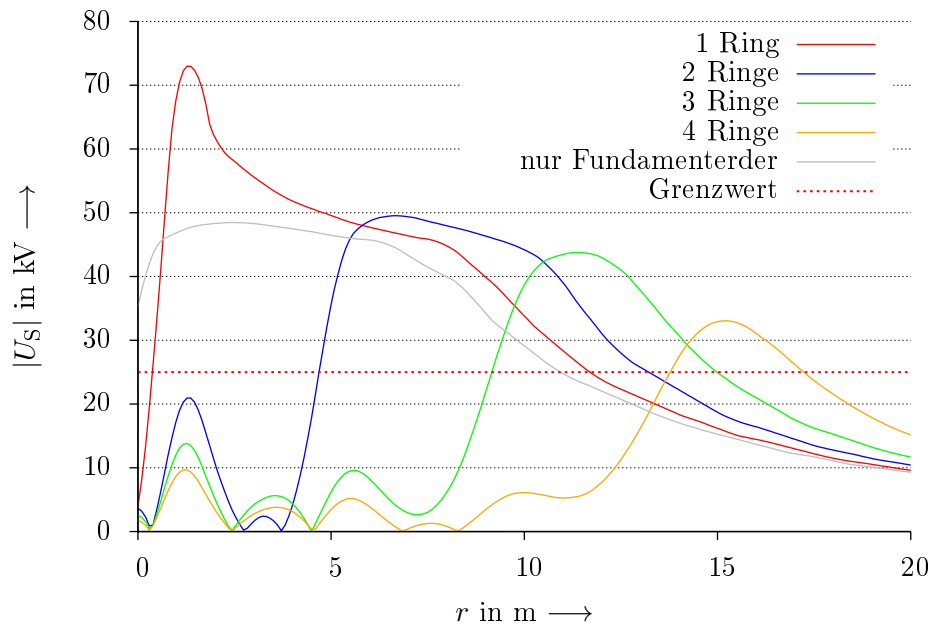


**Abbildung 7.2.:** Schrittspannungen bei Verwendung eines Fundamenterders um Gebäude verschiedener Größe für  $I = 200 \text{ kA}$

## 7. Simulation von Erdungsanlagen



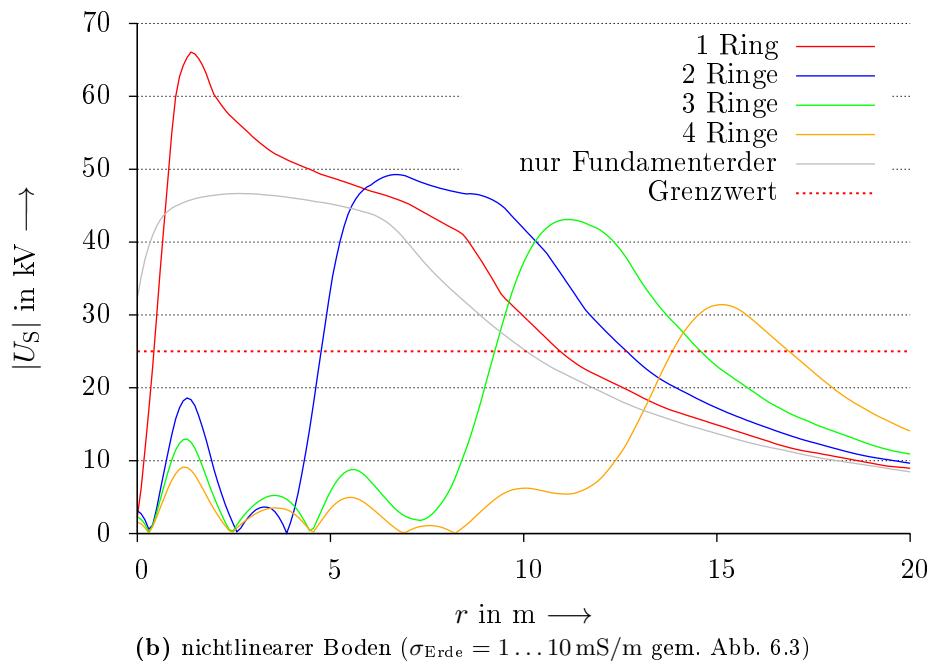
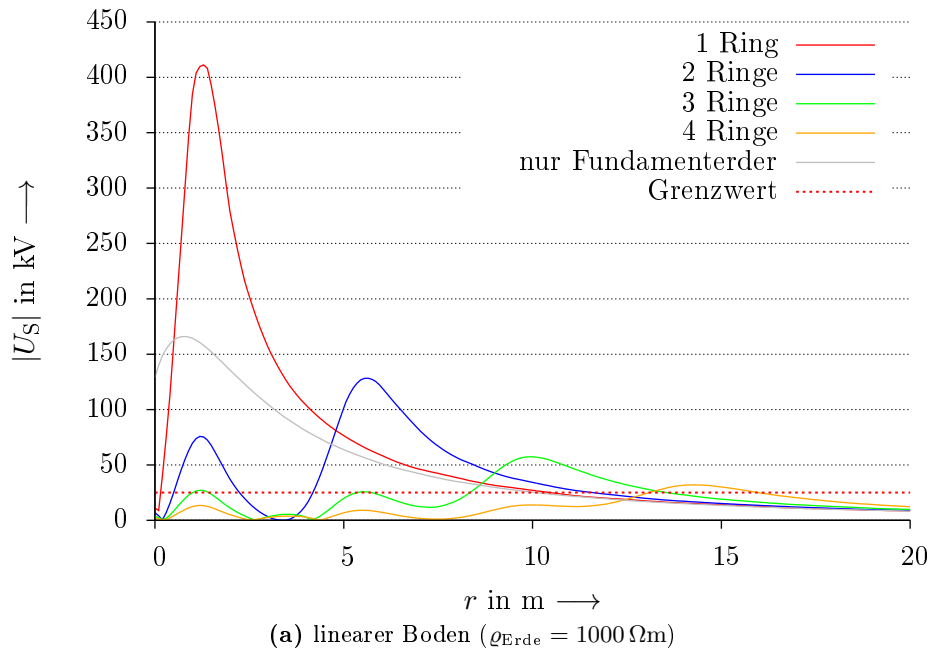
(a) linearer Boden ( $\rho_{\text{Erde}} = 1000 \Omega\text{m}$ )



(b) nichtlinearer Boden ( $\sigma_{\text{Erde}} = 1 \dots 10 \text{ mS/m}$  gem. Abb. 6.3)

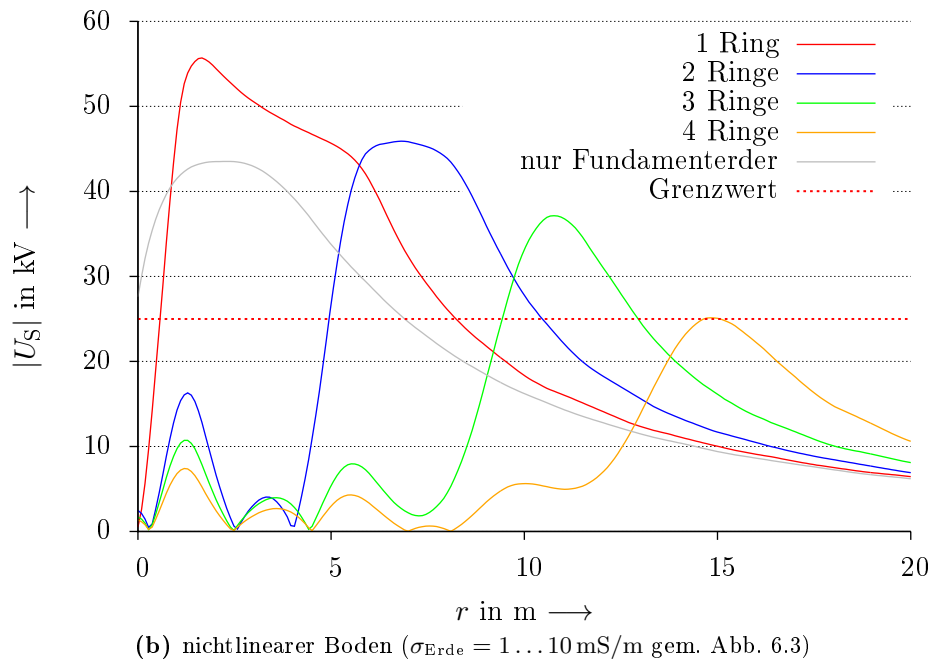
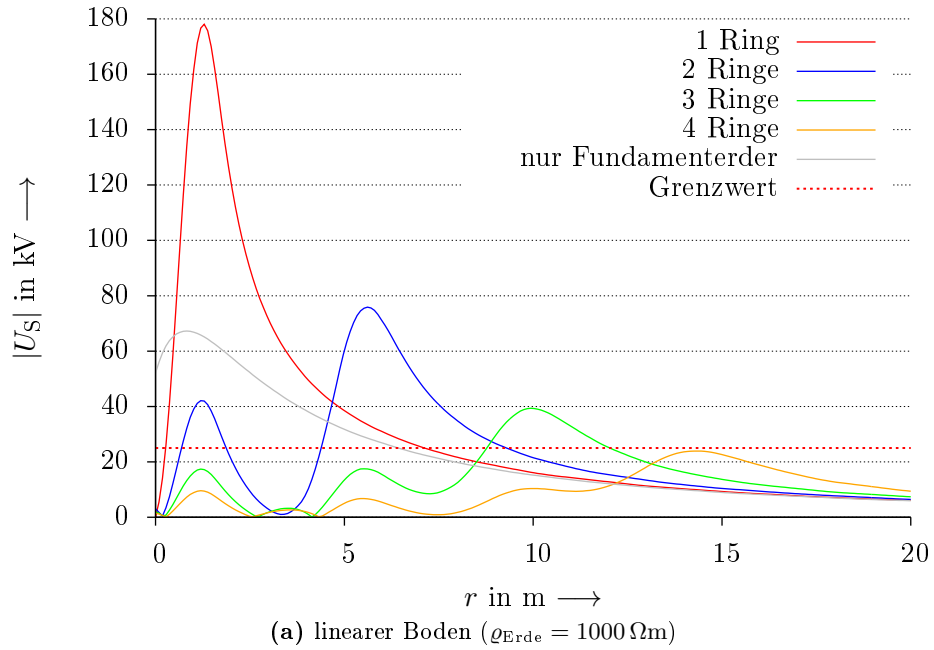
**Abbildung 7.3.:** Schrittspannungen bei Verwendung einer unterschiedlichen Anzahl von Ringern um ein Gebäude von  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  für  $I = 200 \text{ kA}$



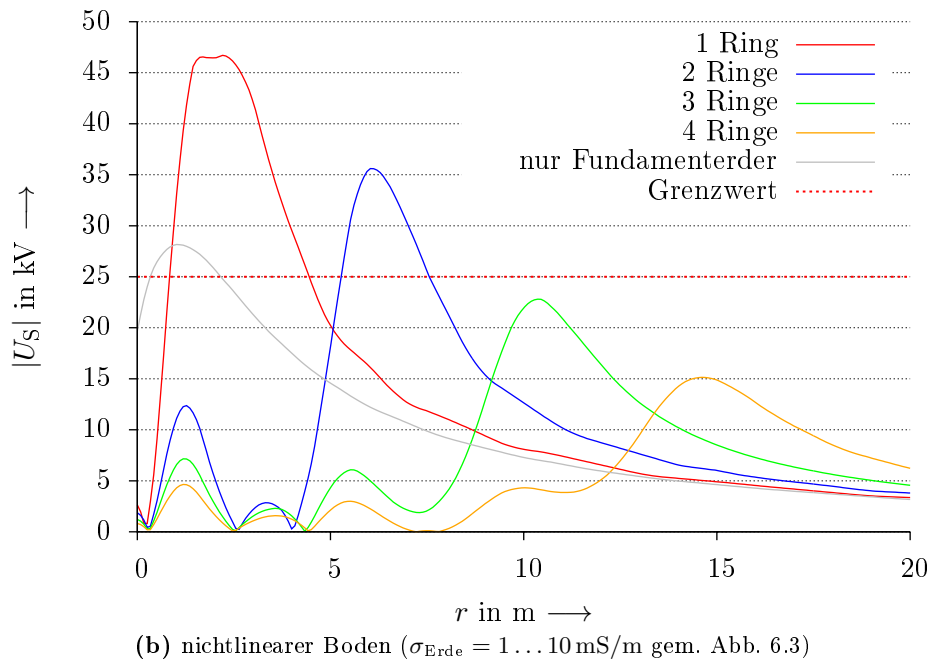
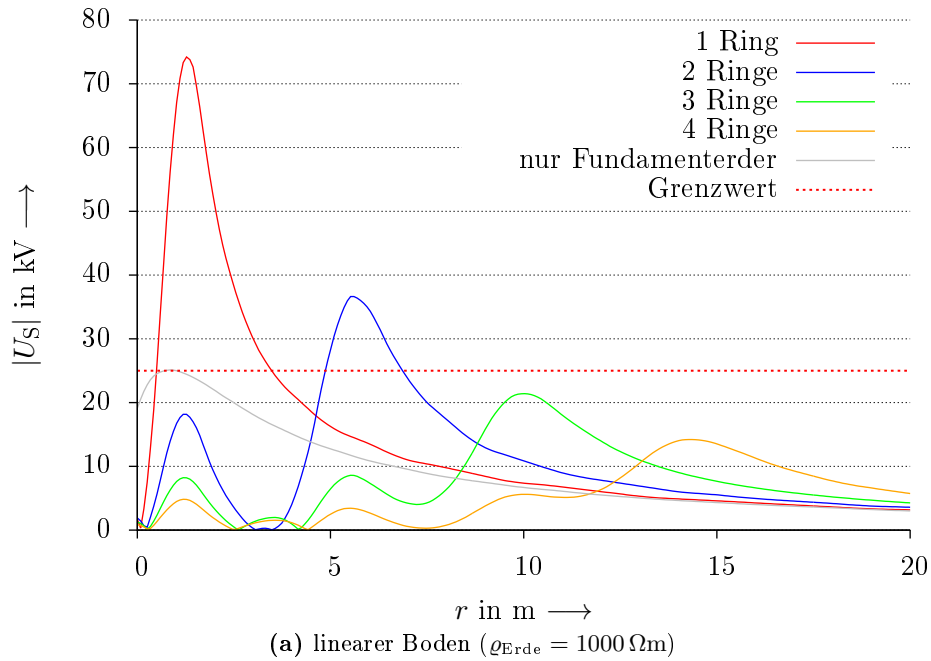


**Abbildung 7.4.:** Schrittspannungen bei Verwendung einer unterschiedlichen Anzahl von Ringerdern um ein Gebäude von  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  für  $I = 200 \text{ kA}$

## 7. Simulation von Erdungsanlagen



**Abbildung 7.5.:** Schrittspannungen bei Verwendung einer unterschiedlichen Anzahl von Ringern um ein Gebäude von  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  für  $I = 200 \text{ kA}$



**Abbildung 7.6.:** Schrittspannungen bei Verwendung einer unterschiedlichen Anzahl von Ringerdern um ein Gebäude von  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m}$  für  $I = 200 \text{ kA}$

## 7. Simulation von Erdungsanlagen

spannungen jedoch unter diejenigen eines einzelnen Fundamenterders. Somit ist die Vorgabe durch die Norm in diesem Zusammenhang nicht korrekt. Bei der Wahl zwischen einem Fundamenterder und einem Ringerder in der Nähe der Erdoberfläche sollte stets der Fundamenterder bevorzugt werden.

Bei den beiden kleineren untersuchten Gebäudegrößen wird jedoch selbst mit vier Ringerdern bei einem Blitzstrom von  $I = 200 \text{ kA}$  ein Unterschreiten des Grenzwertes nicht an jedem beliebigen Ort ermöglicht. Erst bei kleineren Blitzströmen (entsprechend niedrigeren Gefährdungspegeln) oder bei größeren Gebäuden ist ein Einhalten des Grenzwertes möglich.

Zu beachten ist dabei außerdem, dass die Orte höchster Schrittspannungen bei Erdungsanlagen mit zwei oder mehr Ringerdern nicht innerhalb der Erdungsanlage liegen, sondern stattdessen am Rand außerhalb der Erdungsanlage, wo das durch die Ringerder gesteuerte elektrische Strömungsfeld in ein ungesteuertes, „freies“ Strömungsfeld übergeht. Zudem ist zu beobachten, dass sich die Schrittspannungsverläufe bei einer gegebenen Gebäudegröße unabhängig von der Anzahl der verwendeten Ringe in einer größeren Entfernung vom Gebäude ( $r > 20 \text{ m}$ ) einem gemeinsamen Verlauf annähern.

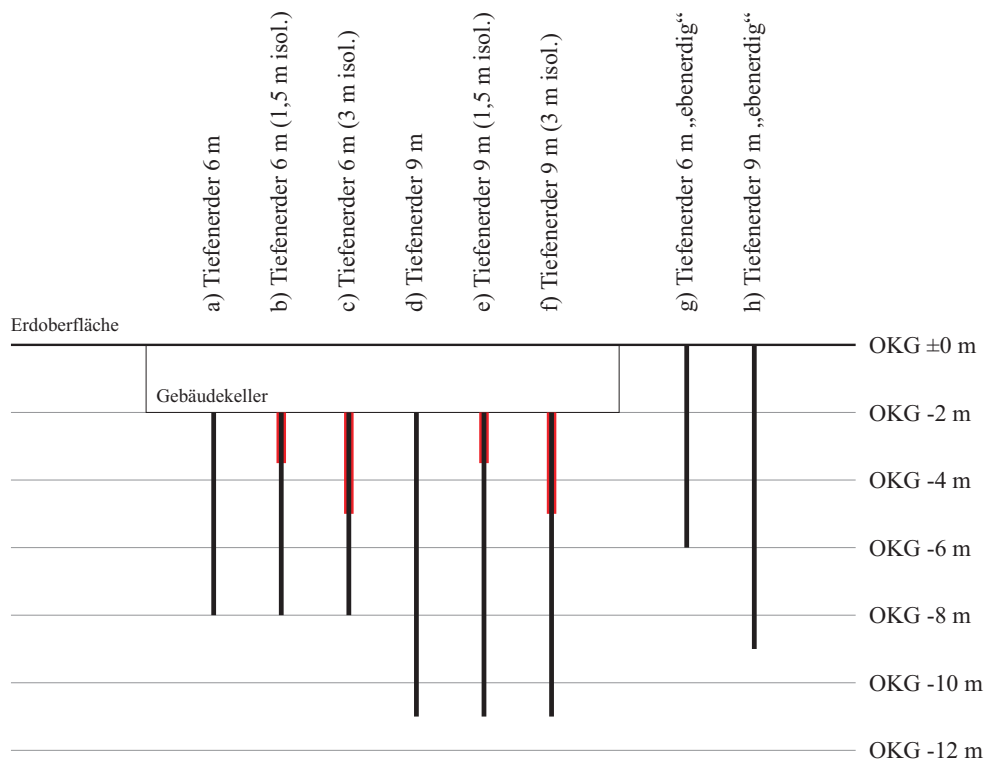
### 7.1.3. Tiefenerder

Tiefenerder (Staberder) wurden in zahlreichen Varianten untersucht, wie in Abbildung 7.7 zu sehen ist. Dabei kamen grundsätzlich zwei verschiedene Erderlängen, 6 m und 9 m, zum Einsatz, die sich an der Segmentlänge (1,50 m) marktüblicher Systeme zum Errichten von Stabern orientieren. Die Erderstäbe hatten dabei durchgängig einen Durchmesser von 6 cm. Die Tiefenerder wurden mit verschiedenen „Starttiefen“, d. h. unterschiedlichen Tiefen des oberen Erderendes (vgl. Auflistung weiter unten), modelliert und teilweise auch mit einer Isolation versehen. Dabei wurde grundsätzlich bei den drei kleinsten untersuchten Gebäudegrößen je ein Tiefenerder pro Gebäudeecke platziert, wie in Abbildung 7.8a gezeigt. Beim Gebäude von  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m}$  wurden entlang der Gebäudelängsseite zusätzliche Erder im 10-m-Raster platziert, wie in Abbildung 7.8b zu sehen ist. Eine Fundamentplatte wurde im Gegensatz zur Modellierung der Fundament- und Ringerder hierbei nicht berücksichtigt.

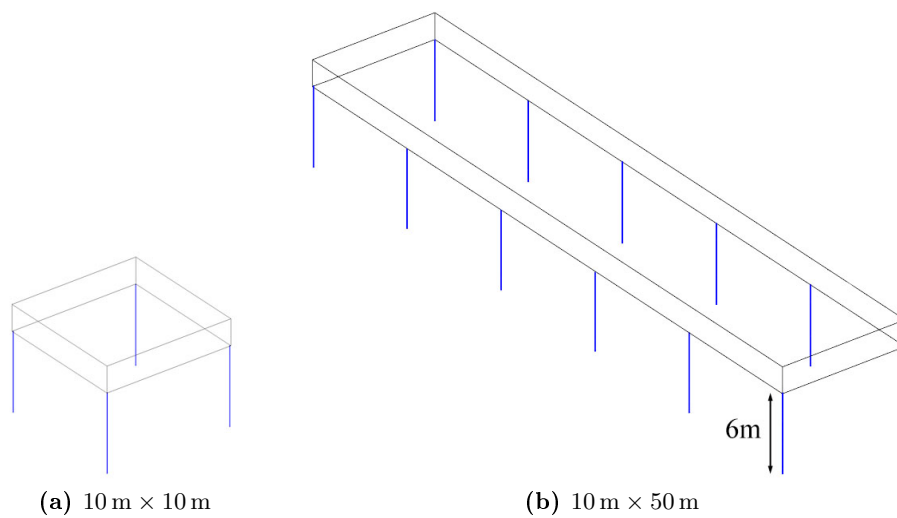
Die Staberder wurden in folgenden Ausführungsvarianten modelliert:

- Beginnend im Gebäudekeller, das heißt oberes Ende des Erders 2 m unter Oberkante Gelände (OKG). (Buchstaben a) und d) in Abbildung 7.7.) Bei einer praktischen Ausführung könnten diese Tiefenerder an einen Fundamenterder angeschlossen sein – ein solcher ist jedoch nicht Teil dieses Simulationsmodells.<sup>1</sup>
- Wie vor, jedoch sind die obersten 1,5 m des Stabers mit einer elektrischen Isolierung versehen. (Buchstaben b) und e) in Abbildung 7.7.)

<sup>1</sup>Auf die Modellierung eines Fundamenterders wurde verzichtet, um die Auswirkungen von Tiefen- und Fundamenterdern getrennt untersuchen zu können. Das Hinzufügen eines Fundamenterders würde zudem die Gesamterderlänge der Erdungsanlage erhöhen und damit zu niedrigeren Schrittspannungen führen. Vor diesem Hintergrund stellt der Verzicht auf einen Fundamenterder auch eine Worst-Case-Betrachtung dar.

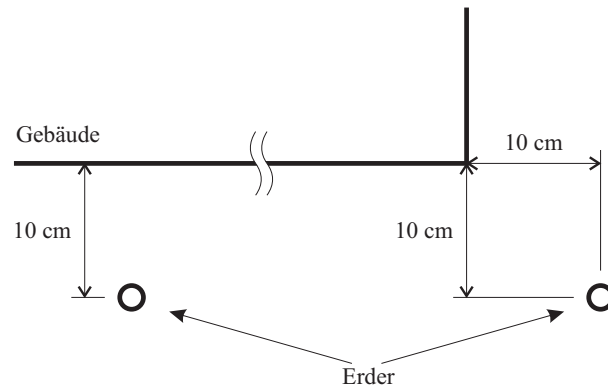


**Abbildung 7.7.:** Planskizze der Tiefenverhältnisse der simulierten Staberder. Isolierungen sind rot eingefärbt.



**Abbildung 7.8.:** Planskizze der Verteilung von senkrechten Staberdern (blau gefärbt) um Gebäude unterschiedlicher Größe, hier am Beispiel einer Erderlänge von 6 m

## 7. Simulation von Erdungsanlagen

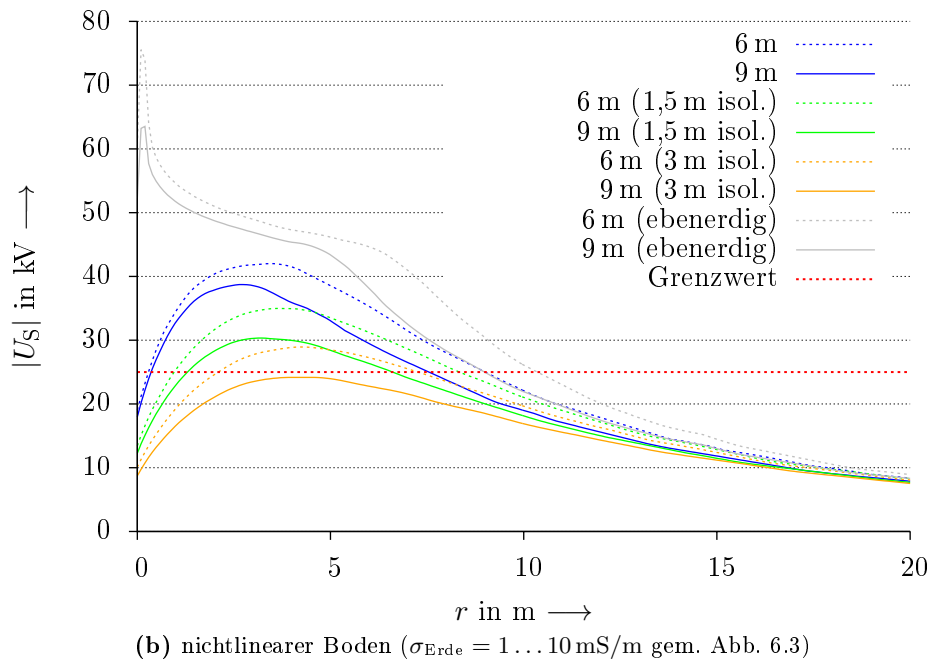
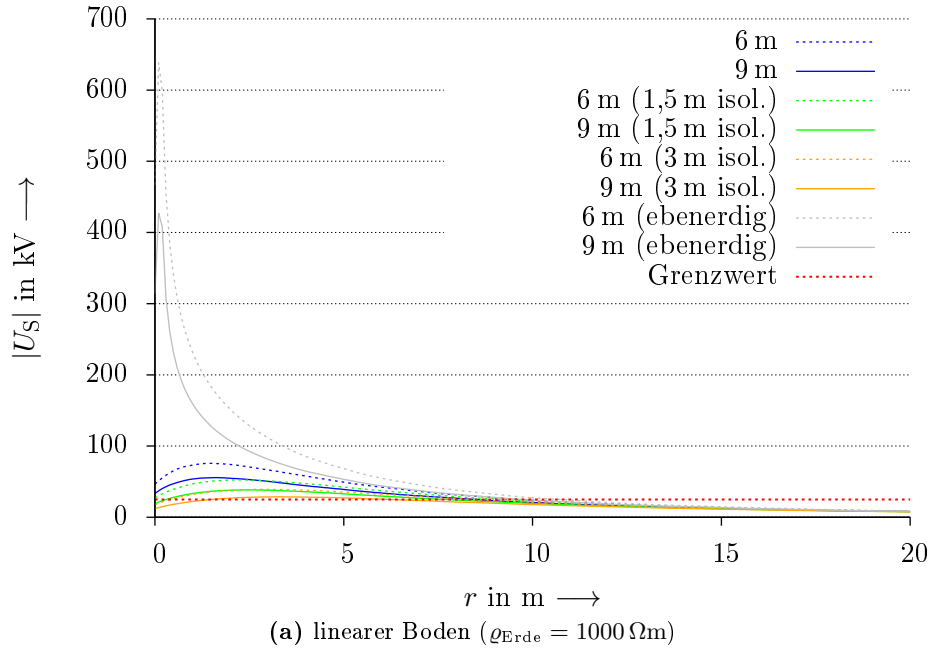


**Abbildung 7.9.:** Planskizze (Draufsicht) zur Positionierung der Staberder außerhalb von Gebäuden

- Wie vor, jedoch mit Isolation der obersten 3 m (Buchstaben c) und f) in Abbildung 7.7.)
- Beginnend an der Oberkante Gelände. (Buchstaben g) und h) in Abbildung 7.7, „ebenerdig“.) Hierbei sind die Erder außerhalb des Gebäudes im Abstand von 10 cm platziert, siehe Abbildung 7.9.

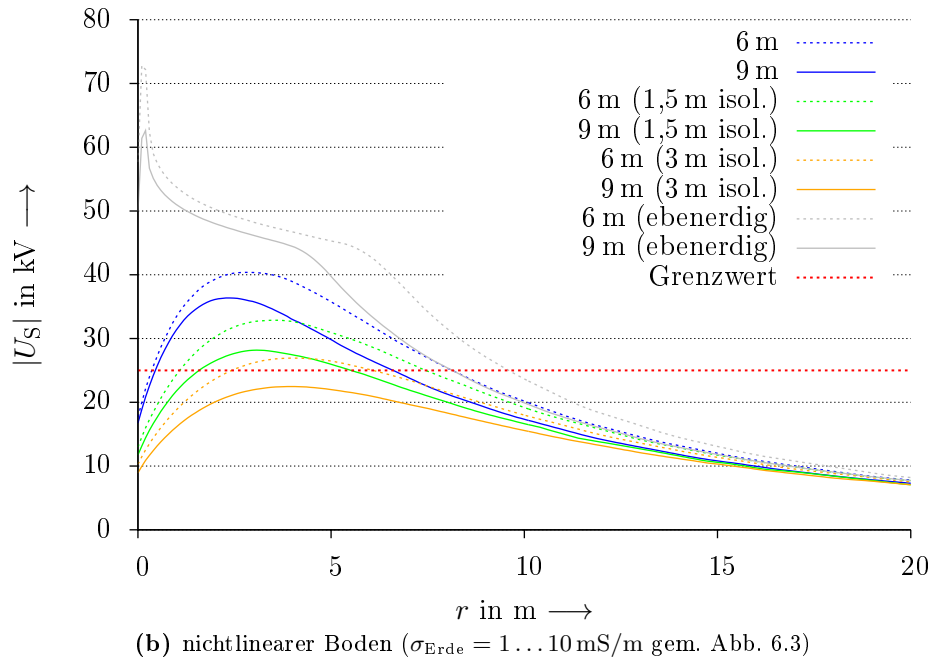
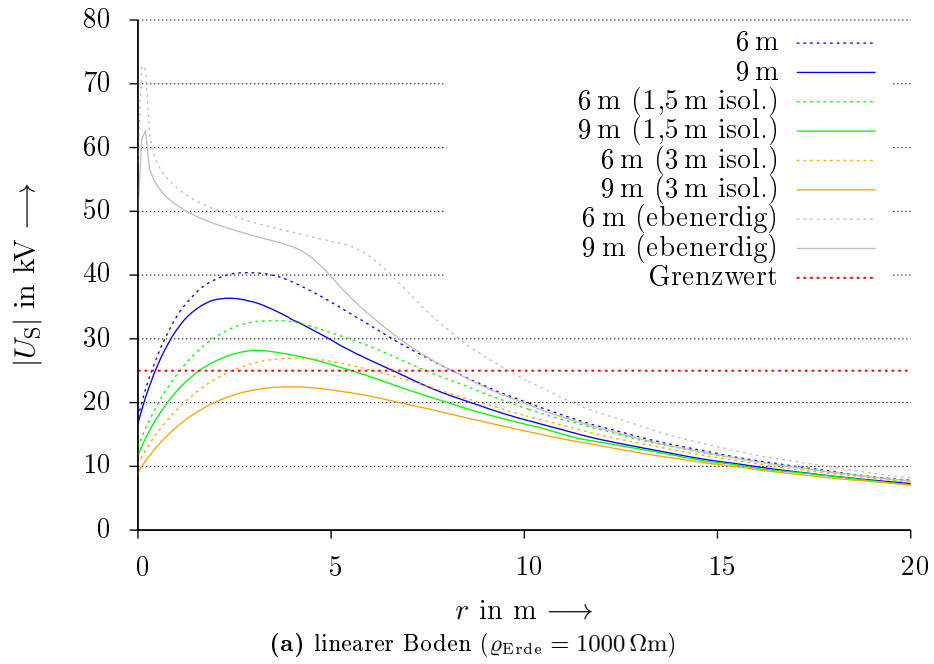
Auf die Simulation einer Kombination aus ebenerdig beginnenden Erder mit einer Isolierung der oberen Erderteile analog den Varianten b) und c) beziehungsweise e) und f) wurde verzichtet, da davon auszugehen ist, dass die Ergebnisse denen der Varianten a) und d) entsprechen.

Die Ergebnisse sind für einen Blitzstrom von 200 kA und nach Gebäudegrößen gruppiert in den Abbildungen 7.10–7.13 zu sehen. Graphen für weitere Stromstärken, bei denen auch die Ergebnisse der niedrigeren Schrittspannungen besser zu erkennen sind, befinden sich in den Abbildungen B.27–B.42 in Anhang B.2. Dabei ist augenfällig, dass insbesondere im Fall linearen Bodens die Schrittspannungen der ebenerdig beginnenden Staberder sehr weit über dem vorgeschlagenen Grenzwert liegen. Im Vergleich dazu fallen die Schrittspannungs-Ergebnisse der im Gebäudekeller beginnenden Tiefenerder deutlich niedriger aus. Bei einem Gebäude der Größe  $10\text{ m} \times 50\text{ m}$  kann damit sogar in jeder modellierten Version und bei jedem der drei Stromwerte der Grenzwert eingehalten werden. Dies ist jedoch auch darauf zurückzuführen, dass hier insgesamt 12 statt 4 Tiefenerder wie bei den kleineren Gebäuden zum Einsatz kommen. Bei den kleineren Gebäudegrößen bietet daher nicht jede beliebige Kombination aus Blitzstromstärke und Staberdervariante einen ausreichenden Schutz gegen zu hohe Schrittspannungen. Es zeigt sich allgemein gesprochen jedoch die Tendenz, dass längere Staberder und Staberder mit isolierten oberen Abschnitten in dieser Hinsicht besser abschneiden. In diesem Zusammenhang muss jedoch auch darauf hingewiesen werden, dass solche Erder zwar zu niedrigeren Schrittspannungen führen, gleichzeitig jedoch andere Nachteile aufweisen: Durch die obere Isolation wird die



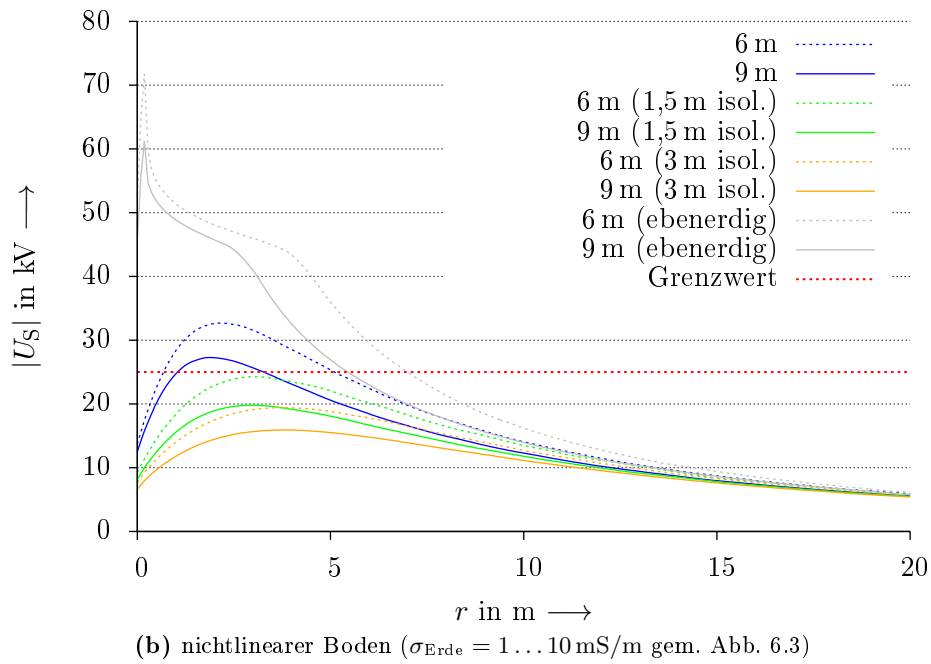
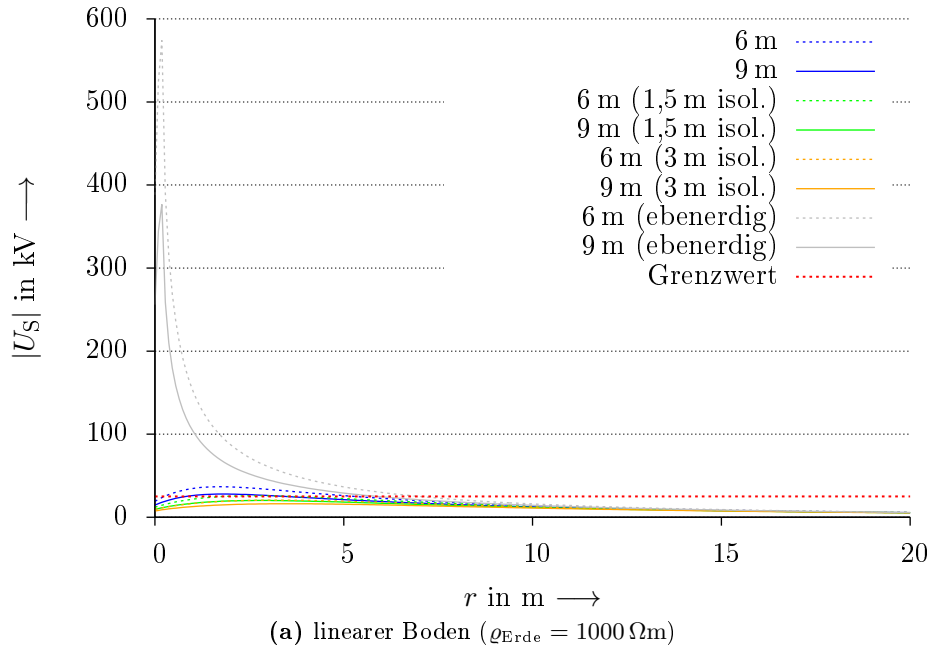
**Abbildung 7.10.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $2\text{ m} \times 2\text{ m}$  bei einem Blitzstrom von  $200\text{ kA}$  und Tiefenerdern verschiedener Längen und Ausführungsvarianten

## 7. Simulation von Erdungsanlagen



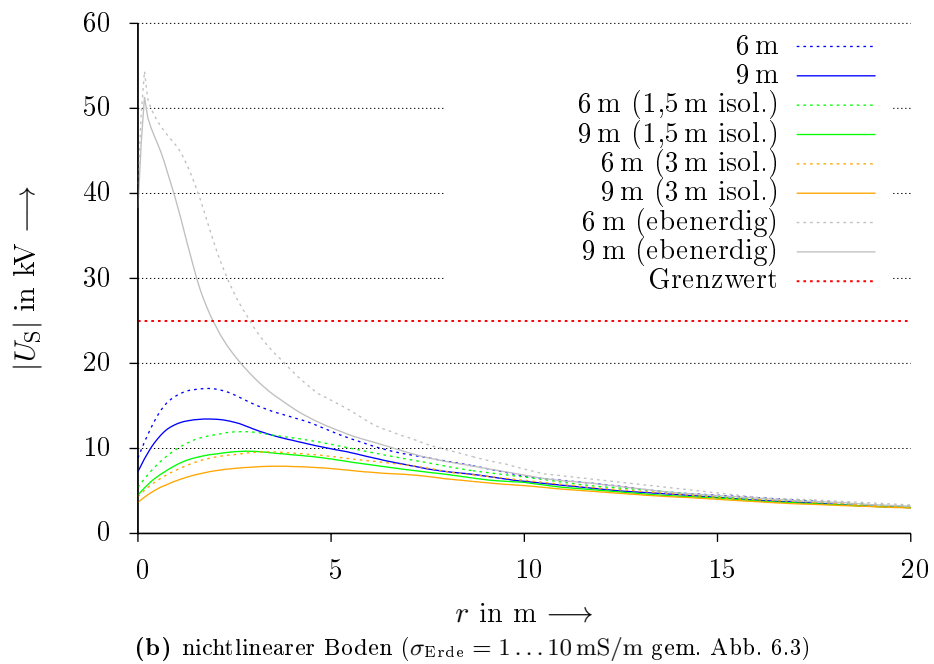
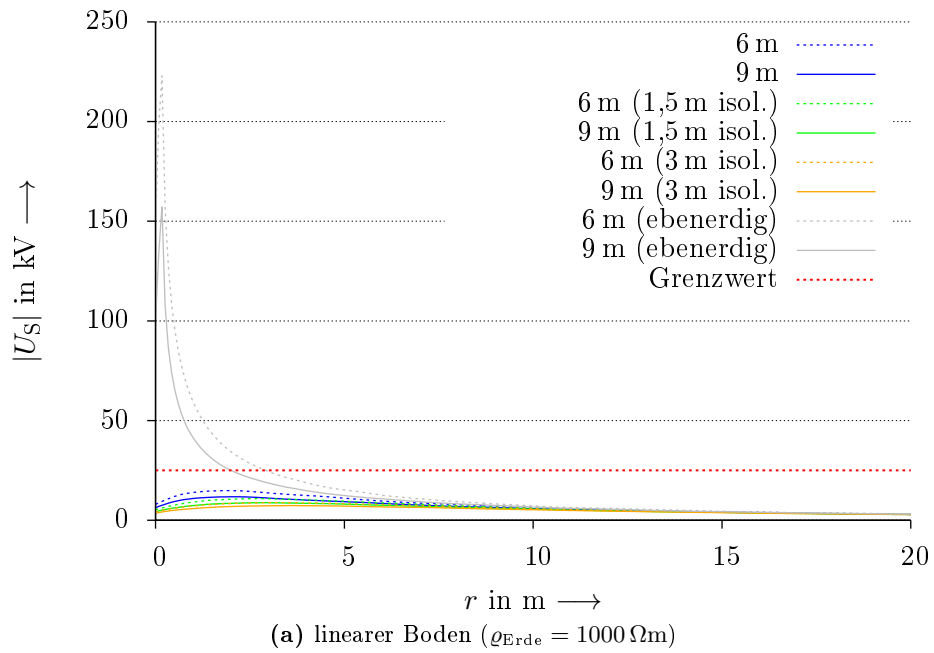
**Abbildung 7.11.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  bei einem Blitzstrom von  $200 \text{ kA}$  und Tiefenerdern verschiedener Längen und Ausführungsvarianten





**Abbildung 7.12.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $10 \, \text{m} \times 10 \, \text{m}$  bei einem Blitzstrom von  $200 \, \text{kA}$  und Tiefenerdern verschiedener Längen und Ausführungsvarianten

## 7. Simulation von Erdungsanlagen



**Abbildung 7.13.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m}$  bei einem Blitzstrom von  $200 \text{ kA}$  und Tiefenerdern verschiedener Längen und Ausführungsvarianten

erdführlige Länge der Erder reduziert, was zu einem erhöhten Erderwiderstand und damit auch zu größeren Potentialanhebungen führt. Dies soll durch folgende Überlegung verdeutlicht werden: Für das Gebäude der Größe  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  wurde für alle Tiefenerder-Varianten – bei linearem Boden und  $200\text{ kA}$  Blitzstrom – das maximale elektrische Potential an der Anschlussfahne (vgl. Kapitel 6.1.1 – im Prinzip identisch mit der Erderspannung gemäß DIN EN 62305-3) ermittelt und durch den Strom dividiert. Somit ergibt sich der für die Simulation gültige Erdungswiderstand. Es muss jedoch mit Hinweis auf Kapitel 6.2.3 betont werden, dass die so ermittelten Werte einer gewissen Abweichung von realen Erdungswiderständen unterliegen. Da aber die Größe des Simulationsgebietes innerhalb dieser Untersuchung nicht verändert wurde und die geometrischen Abmessungen der miteinander verglichenen Erdungsanlagen in derselben Größenordnung liegen, kann davon ausgegangen werden, dass die Werte für einen Vergleich untereinander geeignet sind. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.1 zu finden.

**Tabelle 7.1.:** Maximale elektrische Potentiale  $\Phi$  und daraus resultierende Erdungswiderstände  $R_E$  bei unterschiedlichen Tiefenerder-Konfigurationen (Werte gerundet)

Konfiguration		$\Phi$ in MV	$R_E$ in $\Omega$
a)	Tiefenerder 6 m	8,5	42,6
b)	Tiefenerder 6 m, 1,5 m isoliert	10,0	50,1
c)	Tiefenerder 6 m, 3 m isoliert	12,9	64,7
d)	Tiefenerder 9 m	6,5	32,4
e)	Tiefenerder 9 m, 1,5 m isoliert	7,1	35,6
f)	Tiefenerder 9 m, 3 m isoliert	8,1	40,5
g)	Tiefenerder 6 m, „ebenerdig“	9,3	46,3
h)	Tiefenerder 9 m, „ebenerdig“	6,9	34,4

Besonders augenfällig wird der Zusammenhang beim Vergleich der Erdervarianten d) und h): Die Erderlänge beträgt in beiden Fällen 9 m und die Potentiale sowie die Erdungswiderstände weichen um nur ca. 5 % voneinander ab. Wie jedoch Abbildung 7.12a gezeigt hat, unterscheiden sich die jeweils resultierenden Schrittspannungen deutlich voneinander.

Daher müssen in der Praxis beim Einsatz von teilisolierten Tiefenerdern die beiden gegenläufigen Eigenschaften des niedrigen Erdungswiderstandes und der niedrigen Schrittspannungen gegeneinander abgewogen werden.

Zudem muss darauf hingewiesen werden, dass die auf Kellerniveau beginnenden Tiefenerder ihre hier gezeigte Wirkung nur dann entfalten können, wenn die Anbindung der Erder an die Ableitungen nicht erdfühlig – also beispielsweise mit isolierten Leitungen – erfolgt. Andernfalls würde bereits die Anschlussleitung wie ein Erder wirken und es würden sich Schrittspannungen ähnlich den Tiefenerder-Varianten g)

## 7. Simulation von Erdungsanlagen

und h) einstellen.

Die Norm DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3) sieht Tiefenerder zwar als Erdervariante „Typ A“ vor (vgl. Kapitel 3.2.1), jedoch fordert sie lediglich eine Mindestdiefe des oberen Tiefenerder-Endes von 50 cm. Es ist jedoch davon auszugehen, dass eine solche Ausführung zu Schrittspannungen ähnlich der Varianten g) und h) führt, welche selbst bei großen Gebäuden keinen ausreichenden Schutz vor gefährlichen Schrittspannungen bieten.

### 7.1.4. Schrägerder

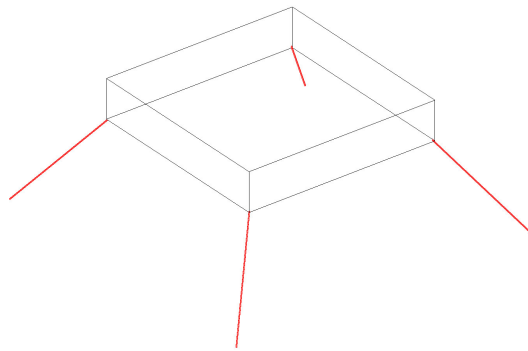
Als Abwandlung der senkrecht eingebrachten Staberder wurden auch Staberder simuliert, welche im Winkel von  $45^\circ$  gegenüber der Horizontalen geneigt sind (vgl. Abbildung 7.15) und die im Folgenden als „Schrägerder“ bezeichnet werden sollen. Dies geschah, um zu untersuchen, ob sich durch die nach außen gerichteten Erderstäbe ein feldsteuernder Effekt ähnlich den Ringerdern einstellt und so möglicherweise die Vorteile von Tiefenerdern (Ableitung der Blitzströme möglichst tief in den Boden sowie vergleichsweise einfache Montage) mit den Vorteilen von Ringerdern (gute Feldsteuerung um das Gebäude) kombiniert. Wie auch die senkrechten Staberder wurden die Schrägerder jeweils mit einer Länge von 6 m und 9 m untersucht. Ebenso wie bei den Tiefenerdern wurde hierbei keine Fundamentplatte ins Simulationsmodell einbezogen. Bezüglich der Ausrichtung der Schrägerder relativ zum Gebäude wurden zwei Varianten unterschieden:

**Typ 1** Hierbei befindet sich an jeder Gebäudeecke ein einzelner Schrägerder, der im  $45^\circ$ -Winkel zu den Gebäudewänden steht. Beim Gebäude  $10\text{ m} \times 50\text{ m}$  wurden analog zu den senkrechten Staberdern entlang der Gebäudelängsseiten zusätzliche Schrägerder im 10-m-Raster verwendet, die senkrecht zu den Gebäudewänden stehen. (Siehe Abbildungen 7.14 und 7.16a.)

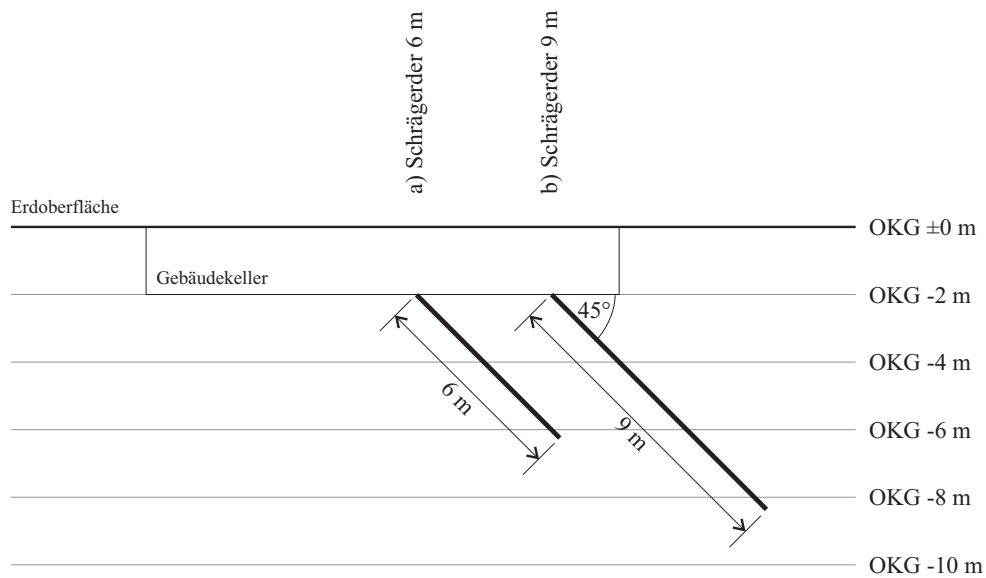
**Typ 2** Hierbei befinden sich an jeder Gebäudeecke zwei Schrägerder, die sowohl zueinander als auch zu den Gebäudewänden im  $90^\circ$ -Winkel stehen. Das Gebäude  $10\text{ m} \times 50\text{ m}$  ist identisch zu Typ 1 mit zusätzlichen Erdern versehen. (Siehe Abbildung 7.16b)

Auf Grund der Ergebnisse der senkrechten Staberder wurden die Schrägerder ausschließlich in Varianten simuliert, bei denen das obere Stabende auf Kellerniveau beginnt (vgl. 7.15). Auf eine Untersuchung von teilweise isolierten Schrägerdern wurde verzichtet. In Voruntersuchungen, die hier aus Platzgründen nicht dargestellt sind, wurde nachgewiesen, dass trotz des erwarteten feldsteuernden Effekts der Schrägerder auch hier die höchsten Schrittspannungen entlang der  $45^\circ$ -Auswertachse (vgl. Kapitel 6.1.4) auftreten.

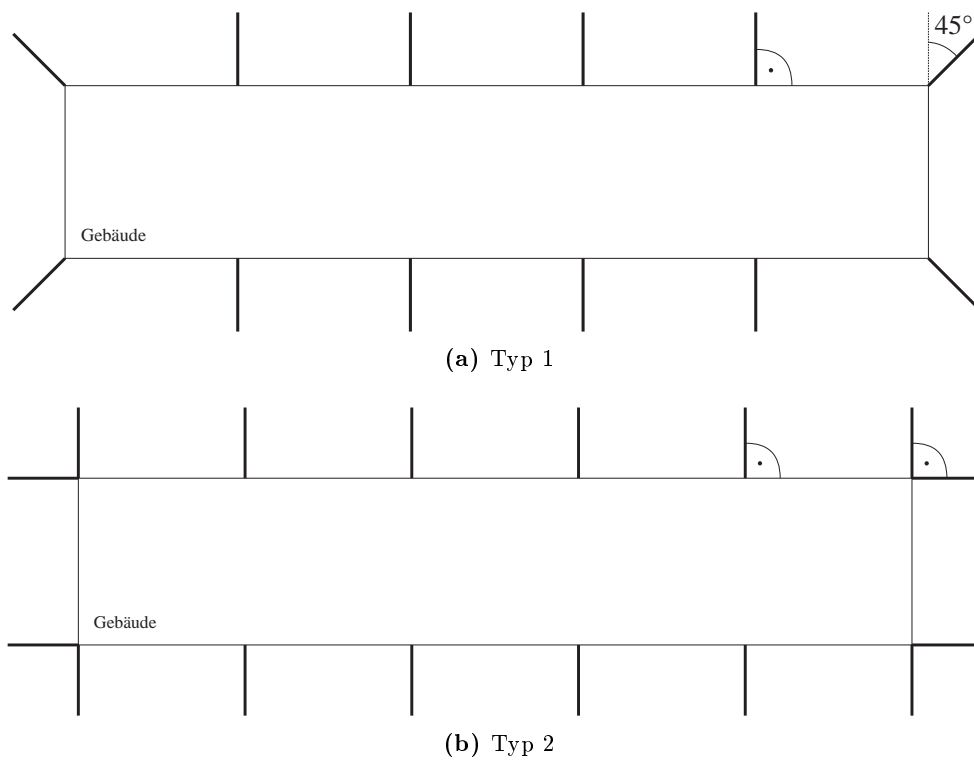
Die Ergebnisse sind für einen Blitzstrom von 200 kA in den Abbildungen 7.17 bis 7.20 zu sehen, wobei diese zu Vergleichszwecken auch die Schrittspannungswerte für senkrechte Tiefenerder (Ausführungsvarianten a) und d) in Abbildung 7.7) enthalten. Die Ergebnisse für weitere Blitzstromstärken sind in den Abbildungen B.43–B.50 in



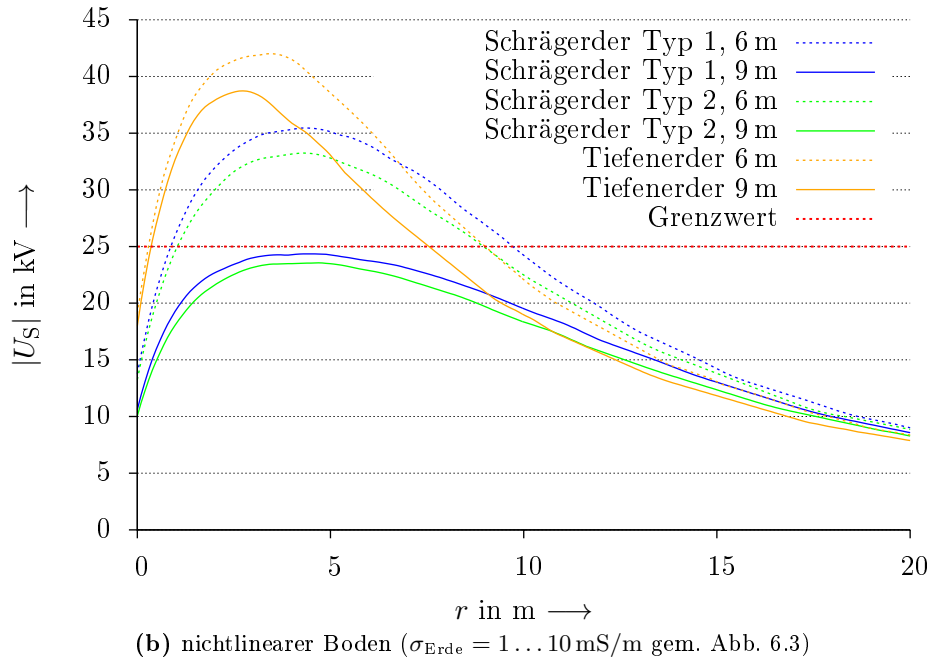
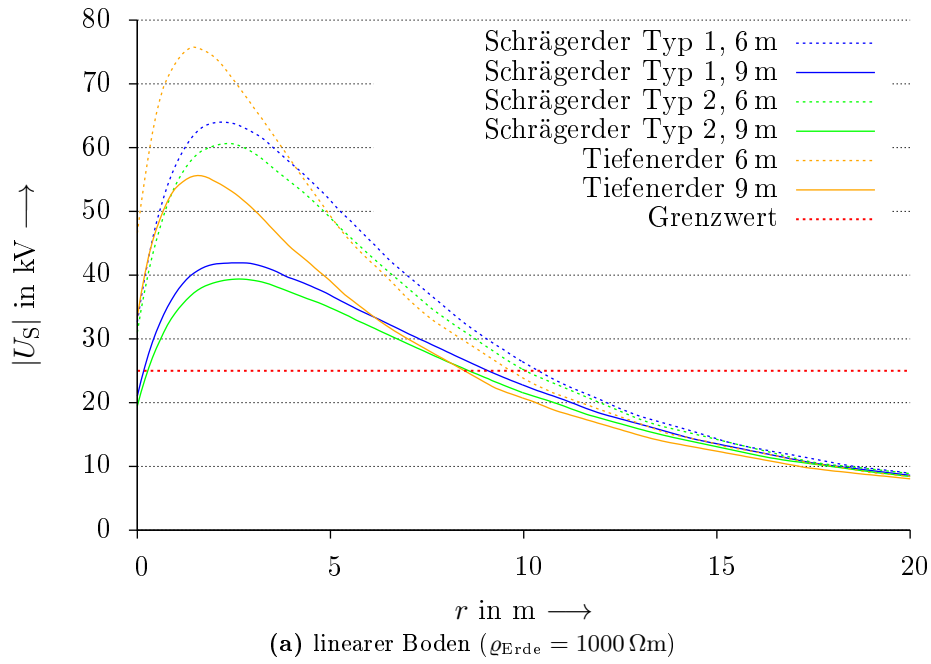
**Abbildung 7.14.:** Perspektivische Darstellung der Schrägerder am Beispiel der Ausführung Typ 1 mit 6 m Länge an einem Gebäude 10 m × 10 m. Die Erderstangen sind rot eingefärbt



**Abbildung 7.15.:** Planskizze der Tiefenverhältnisse der simulierten Schrägerder

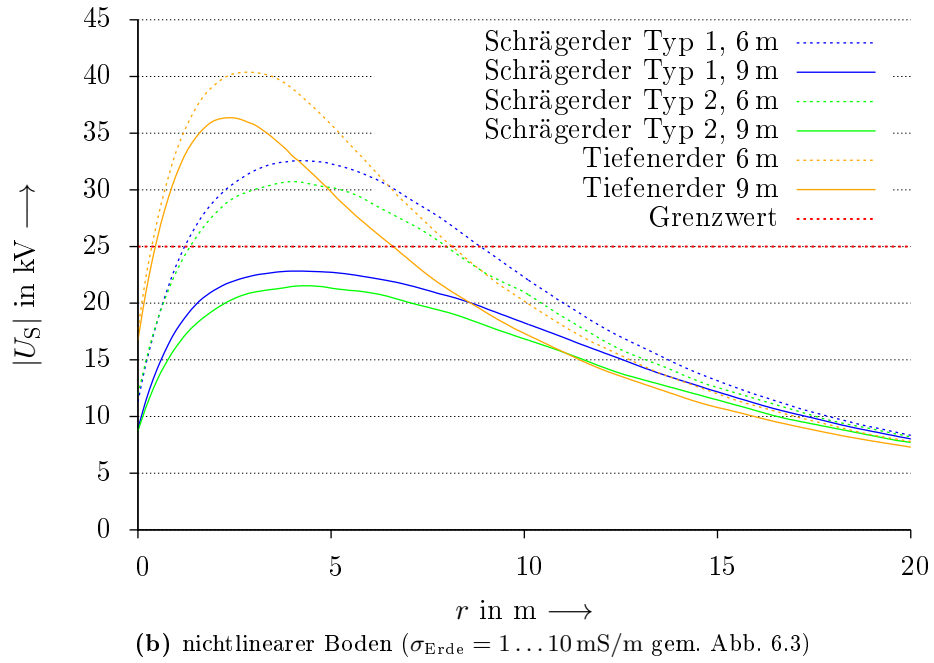
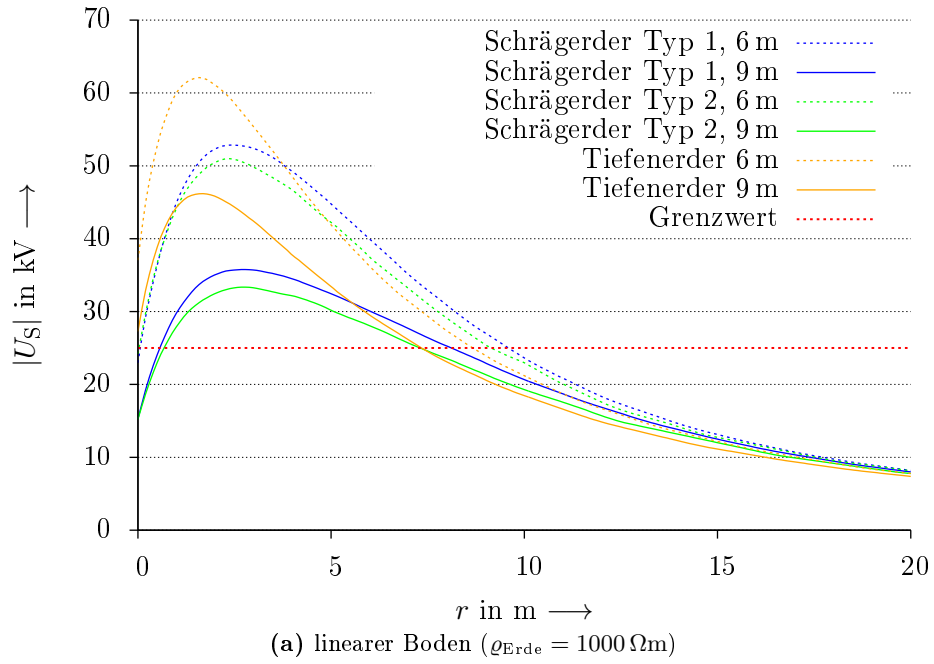


**Abbildung 7.16.:** Planskizze zur Ausrichtung der beiden untersuchten Schrägerdertypen am Beispiel eines Gebäudes von  $10\text{ m} \times 50\text{ m}$  (Draufsicht)



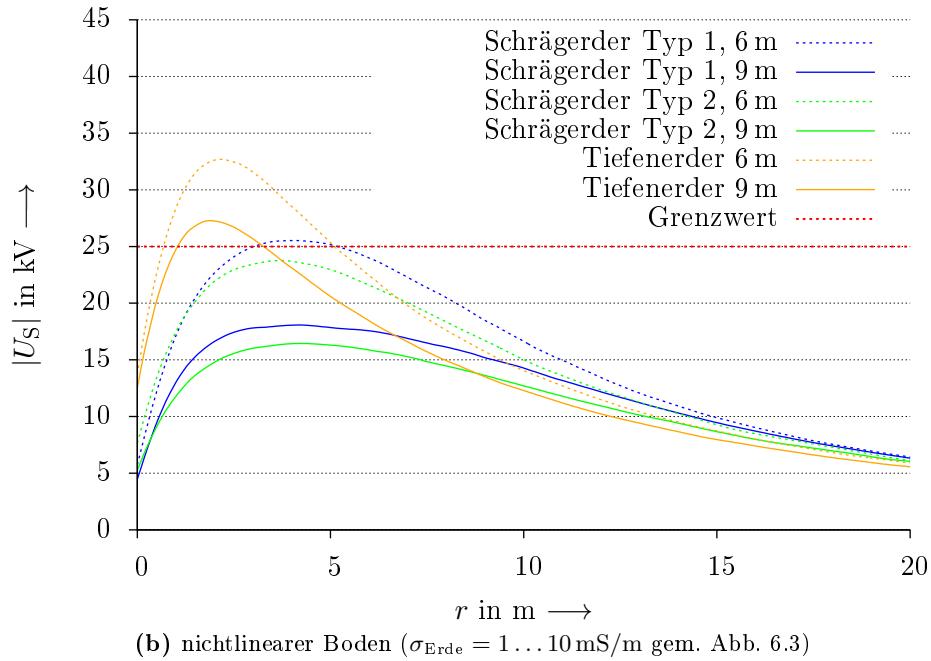
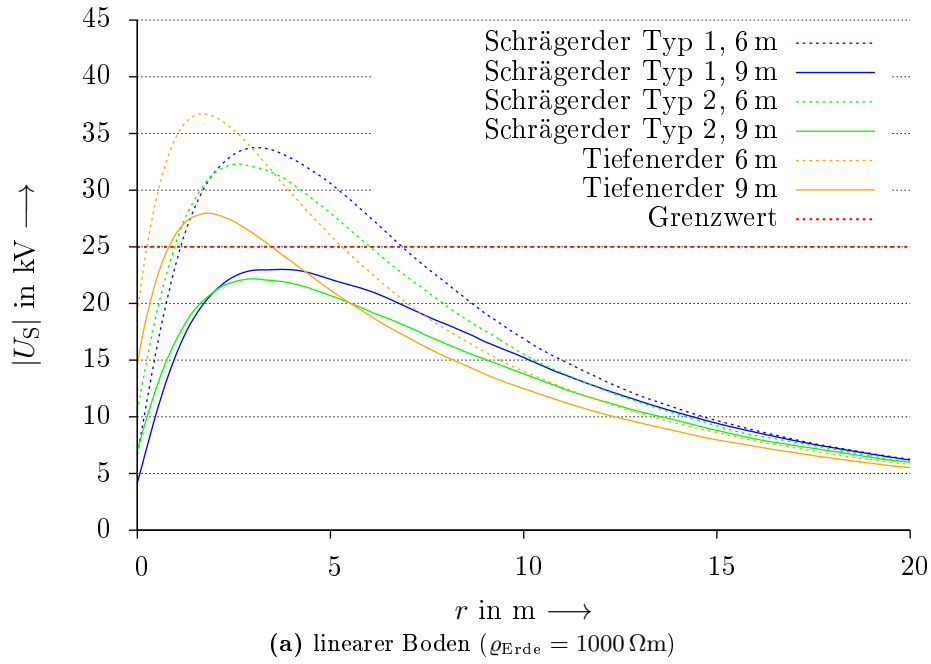
**Abbildung 7.17.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  bei  $I = 200 \text{ kA}$  und Schrägerdern verschiedener Längen

## 7. Simulation von Erdungsanlagen



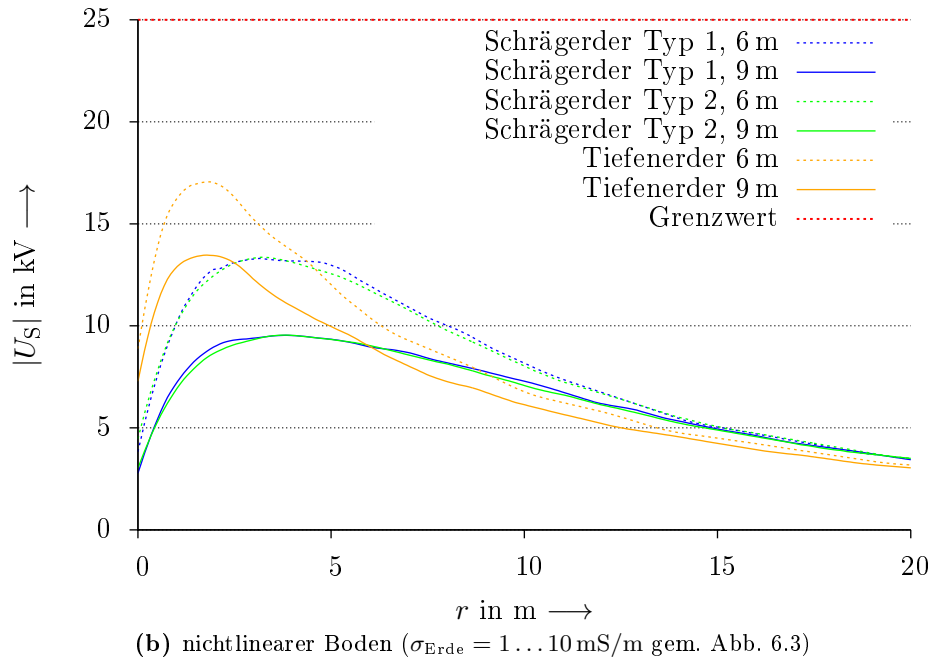
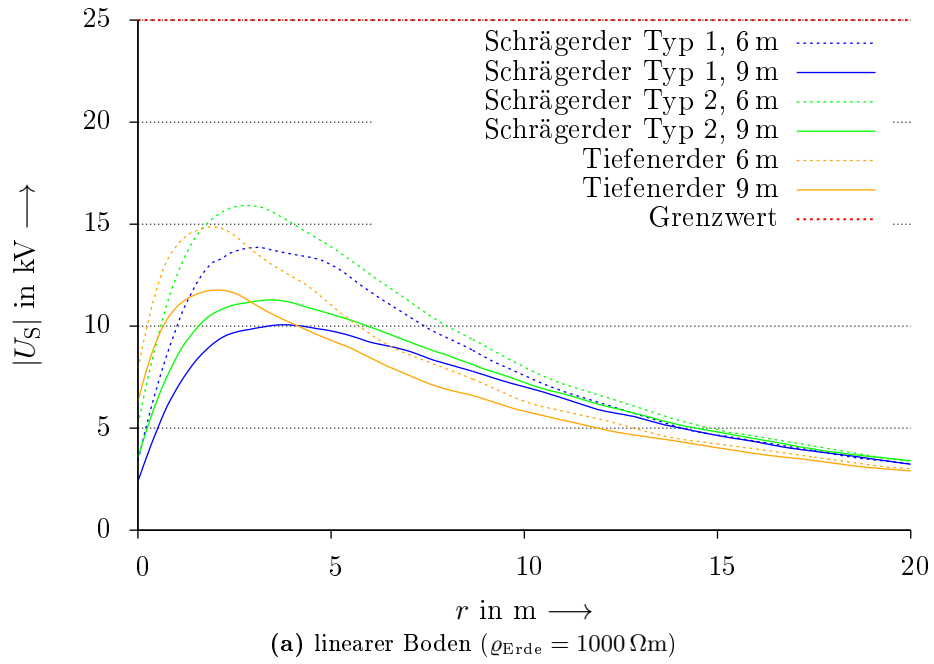
**Abbildung 7.18.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  bei  $I = 200 \text{ kA}$  und Schrägerdern verschiedener Längen





**Abbildung 7.19.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  bei  $I = 200 \text{ kA}$  und Schrägerdern verschiedener Längen

## 7. Simulation von Erdungsanlagen



**Abbildung 7.20.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m}$  bei  $I = 200 \text{ kA}$  und Schrägerdern verschiedener Längen

Anhang B.2 zu finden. Dabei ist zu erkennen, dass die Schrittspannungen bei der Verwendung von Schrägerdern durchgängig niedriger ausfallen als bei der Verwendung gleichlanger senkrechter Tiefenerder. Die Schrägerder Typ 2 liefern dabei nochmals niedrigere Schrittspannungen als die Schrägerder Typ 1, was durch die insgesamt höhere Anzahl von Erderstangen und damit auch einer größeren Länge an Erdern, die in direktem Kontakt mit dem Erdboden stehen, bedingt ist. Somit bleibt festzuhalten, dass, sofern die örtlichen Möglichkeiten bestehen, Schrägerder gegenüber senkrechten Tiefenerdern zu bevorzugen sind, da erstere bei gleicher Anzahl und gleicher Länge niedrigere Schrittspannungen liefern als letztere.

### 7.2. Nichtkonventionelle Erdungskonzepte

Im vorangegangenen Kapitel 7.1 wurden zunächst Erdungsanlagen untersucht, die sich eng an den Vorgaben der DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3) orientierten. Dabei haben sich bereits erste Tendenzen gezeigt, welche Erdungskonzepte besser oder schlechter als andere sind. Eine möglichst universelle Lösung konnte damit jedoch bislang nicht gefunden werden, vielmehr haben sich Vorgaben der Norm als nicht ausreichend oder sogar kontraproduktiv herausgestellt. Daher werden in diesem Kapitel weitere Erdungsanlagen untersucht, die so nicht in der Norm vorgesehen sind und die auf eigenen Überlegungen beruhen. Dabei handelt es sich teilweise um komplett eigenständige Erdungsanlagen und teilweise lediglich um kleinere Modifikationen von Erdungsanlagen, die bereits im vorherigen Abschnitt vorgestellt wurden.

#### 7.2.1. Variationen von Ringerdern

Im Unterschied zu Kapitel 7.1.2 wurden hier die Ringerder abweichend von den Norm-Vorgaben platziert. Dabei sind mehrere Gruppen von Simulationsreihen zu unterscheiden:

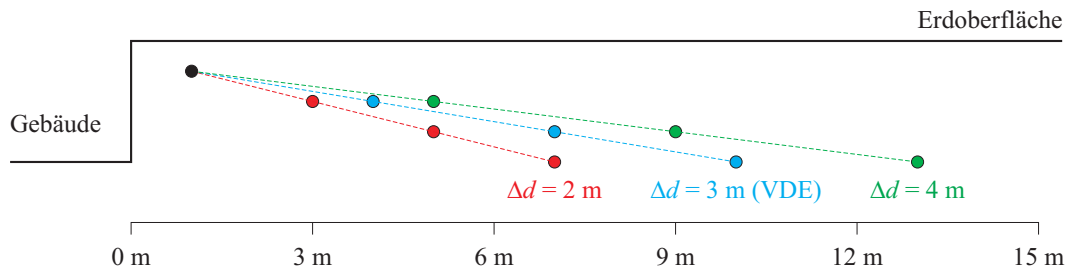
- Variation des horizontalen Ring-Abstandes
- Variation des vertikalen Ring-Abstandes
- Ungleichförmige Verlegung von vier Ringen
- Ungleichförmige Verlegung von weniger als vier Ringen

##### Variation des horizontalen Ring-Abstandes

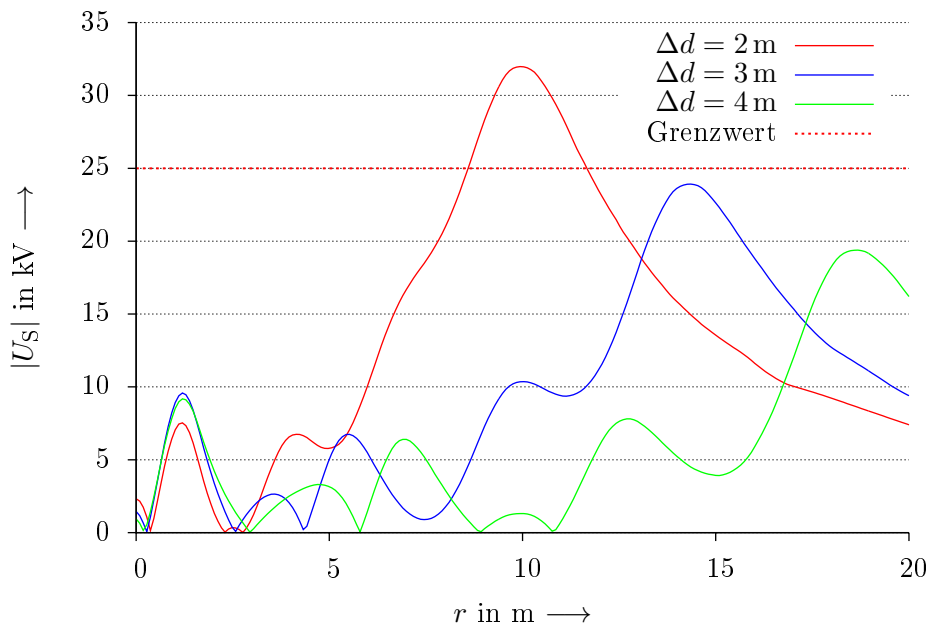
Aus den Ergebnissen der Simulation mit normgemäßer Verlegung von Ringerdern ist zu erkennen, dass sich einerseits die beiden kleinsten Gebäudegrößen auch mit einer Vier-Ringerder-Anlage nicht vollständig gegen das Auftreten gefährlicher Schrittspannungen schützen lassen, andererseits bei einem Gebäude der Größe  $10\text{ m} \times 50\text{ m}$  eine Vier-Ringerder-Anlage bereits eine große Sicherheitsmarge zum vorgeschlagenen Schrittspannungsgrenzwert bietet. Daher wurde diese und alle weiteren Simulationsreihen mit Ringerdern lediglich an einem Gebäude der offensichtlich kritischen Größe  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  und zur Vereinfachung auch nur mit linearem Boden durchgeführt, da dies im Vergleich zum nichtlinearen Boden den ungünstigeren Fall darstellt. Zudem wurde bei dieser und allen folgenden Untersuchungsreihen der innerste Ringerder in allen Fällen auf der nach VDE vorgegebenen Position (1 m Abstand vom Gebäude, 0,5 m Verlegetiefe) beibehalten und nur alle übrigen Ringerder verändert. Dies geschah, da der Ringerder an der genannten Position nach DIN EN 62305-3 als alleiniger Blitzschutzterder dienen können soll, und weitere Ringerder lediglich als zusätzliche Potentialsteuerung vorgesehen sind.

Zunächst wurde bei einer Vier-Ringerder-Anlage der horizontale Abstand  $\Delta d$  zwischen den einzelnen Ringen variiert: gegenüber der VDE-Vorgabe von  $\Delta d = 3\text{ m}$

zum einen eine Verkleinerung auf  $\Delta d = 2$  m und zum anderen eine Vergrößerung auf  $\Delta d = 4$  m. Abbildung 7.21 zeigt eine Skizze der Anordnungen.



**Abbildung 7.21.:** Planskizze der Vier-Ringerder-Anlage bei Variation des horizontalen Ringabstandes  $\Delta d$



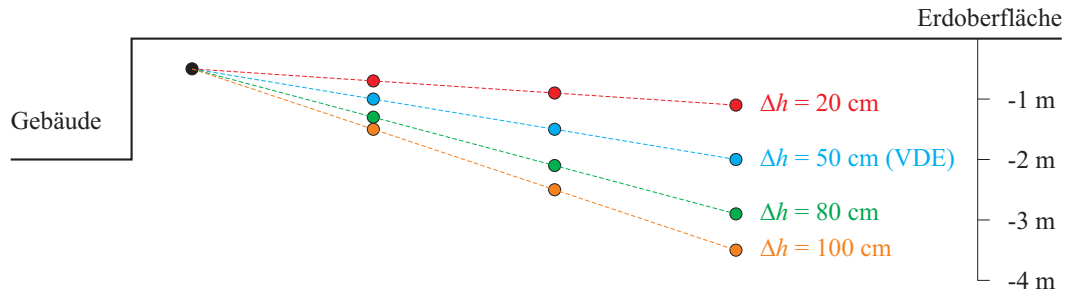
**Abbildung 7.22.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  bei  $I = 200 \text{ kA}$  und vier Ringerdern mit Variation des horizontalen Ringabstandes. ( $\varrho_{\text{Erde}} = 1000 \Omega \text{m}$ )

Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.22 dargestellt. Wie im Vergleich zu erkennen ist, reduziert erwartungsgemäß eine größere horizontale Ausdehnung der Ringerder-Anlage die Schrittspannungen, eine kleinere Ausdehnung erhöht sie. Gleichzeitig fällt auf, dass die höchsten Schrittspannungen an der Ringerder-Anlage gemäß VDE sehr dicht unter dem angenommenen Grenzwert liegen, aus dieser Sicht also ein Optimum darstellen. (Ein größerer horizontaler Abstand liefert zwar geringere Schrittspannungen, erzeugt aber bei der Errichtung höhere Kosten.)

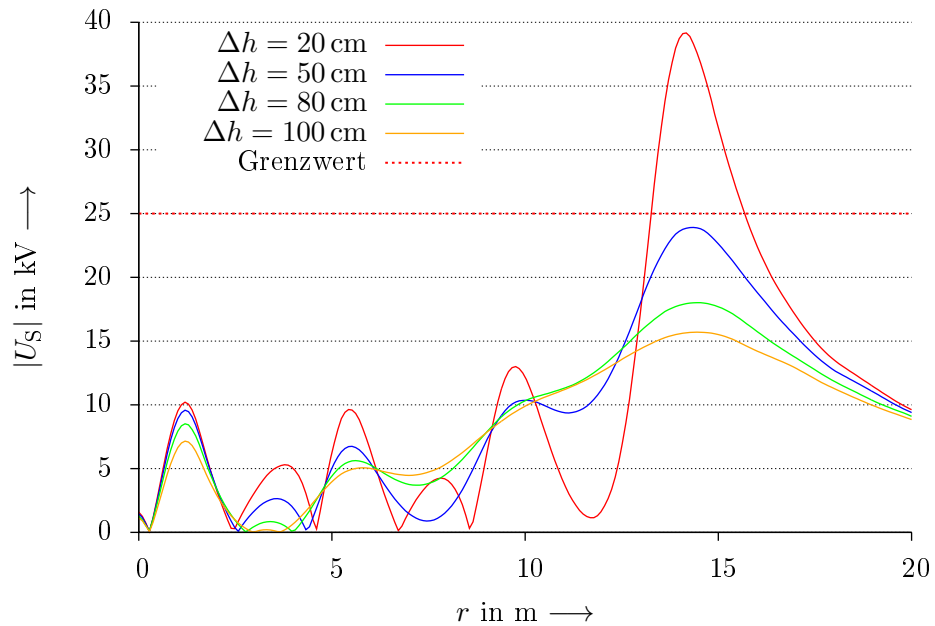
## 7. Simulation von Erdungsanlagen

### Variation des vertikalen Ring-Abstandes

Diese Untersuchungsreihe gleicht derjenigen des vorherigen Abschnittes, jedoch wurde hier der horizontale Abstand  $\Delta d$  konstant gehalten und stattdessen der vertikale Abstand  $\Delta h$  zwischen den einzelnen Ringen variiert. Ausgehend von der VDE-Vorgabe von  $\Delta h = 50$  cm wurde der vertikale Abstand dabei jeweils um 30 cm sowohl verringert als auch vergrößert und zudem auch auf  $\Delta h = 100$  cm erhöht. Die Anordnungen sind in Abbildung 7.23 skizziert.



**Abbildung 7.23.:** Planskizze der Vier-Ringerder-Anlage bei Variation des vertikalen Ringabstandes  $\Delta h$



**Abbildung 7.24.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  bei  $I = 200\text{ kA}$  und vier Ringerdern mit Variation des vertikalen Ringabstandes. ( $\varrho_{\text{Erde}} = 1000\text{ }\Omega\text{m}$ )

Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.24 zu sehen. Analog zur Variation des hori-

zontalen Ringabstandes führt auch eine Vergrößerung des vertikalen Ringabstandes zu niedrigeren Schrittspannungen, jedoch auch zu höheren Verlegekosten. Dementsprechend stellt auch in Bezug auf den vertikalen Ringabstand die VDE-Vorgabe das Optimum im Hinblick auf den Grenzwert-Vorschlag dar. Dies ist umso bemerkenswerter, als sich heute nicht mehr nachvollziehen lässt, auf der Basis welcher Überlegungen die VDE-Vorgaben für Mehrfach-Ringerder festgelegt wurden.

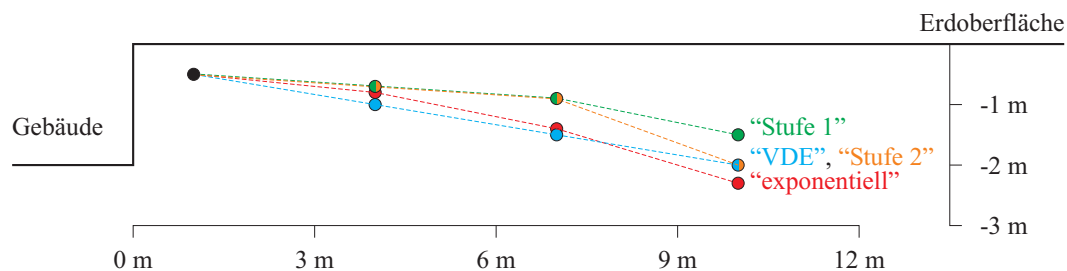
### Ungleichförmige Verlegung von vier Ringen

Bei den beiden vorherigen Untersuchungen wurden die Positionen der Ringerder gleichförmig verändert, wobei sich die Erkenntnis ergab, dass ein Unterschreiten der in der Norm vorgegebenen Abstände und Verlegetiefen nicht empfehlenswert ist. Es stellt sich jedoch die Frage, ob eventuell eine Veränderung nur einzelner Ringpositionen bessere Ergebnisse liefert. Daher wurde im nächsten Schritt untersucht, welchen Einfluss es auf die resultierenden Schrittspannungen hat, wenn die inneren Ringe einer Vier-Ringerder-Anlage weniger tief und damit kostensparend verlegt werden. Dazu wurden drei Fälle herangezogen, die in Abbildung 7.25 skizziert sind. Dabei liegt der horizontale Abstand zwischen den Ringen konstant bei  $\Delta d = 3\text{ m}$ , lediglich die vertikalen Abstände wurde variiert, sodass sich die in Tabelle 7.2 aufgeführten Verlegetiefen ergeben.

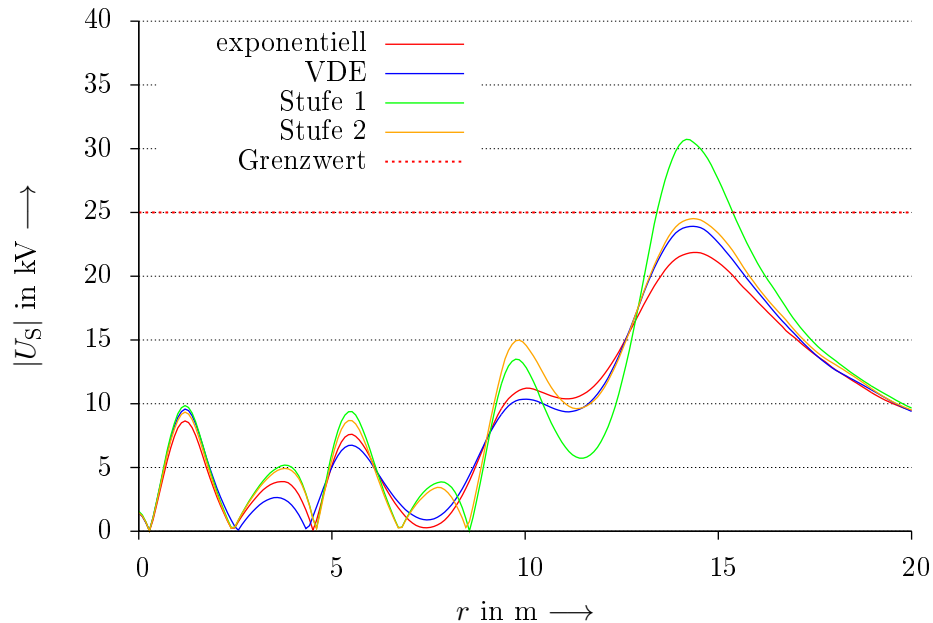
Zum Vergleich ist in Abbildung 7.25 nochmals die Vier-Ringerder-Anlage gemäß VDE eingezeichnet.

**Tabelle 7.2.:** Verlegetiefen der Ringerder bei einer Vier-Ringerder-Anlage und freier Variation der vertikalen Ringabstände

Bezeichnung	Verlegetiefe in cm			
	1. Ring	2. Ring	3. Ring	4. Ring
„exponentiell“	50	80	140	230
„Stufe 1“	50	70	90	150
„Stufe 2“	50	70	90	200



**Abbildung 7.25.:** Planskizze der Vier-Ringerder-Anlage bei ungleichförmiger vertikaler Verteilung der Ringe



**Abbildung 7.26.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  bei  $I = 200\text{ kA}$  und vier Ringerdern mit ungleichförmiger vertikaler Verteilung der Ringe. ( $\rho_{\text{Erde}} = 1000\ \Omega\text{m}$ )

Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.26 zu sehen, auch hier ist zu Vergleichszwecken der Schrittspannungsverlauf der VDE-Vorgabe mit angegeben. Hierbei fällt auf, dass die Schrittspannungs-Maximalwerte der VDE-Anordnung und der Anordnung „Stufe 2“ nahezu identisch sind, obwohl bei der Variante „Stufe 2“ die mittleren beiden Ringe flacher verlegt sind. „Stufe 1“ hingegen, bei der die innersten drei Ringe identisch zu „Stufe 2“ sind, liefert offensichtlich bedingt durch den flacher verlegten äußersten vierten Ring höhere maximale Schrittspannungen. Analog dazu liefert die Variante „exponentiell“ niedrigere Maximal-Schrittspannungen, da hier der äußerste Ring tiefer verlegt ist. Somit ergibt sich hier ein erster Ansatzpunkt für mögliche Optimierungen.

### Ungleichförmige Verlegung von weniger als vier Ringen

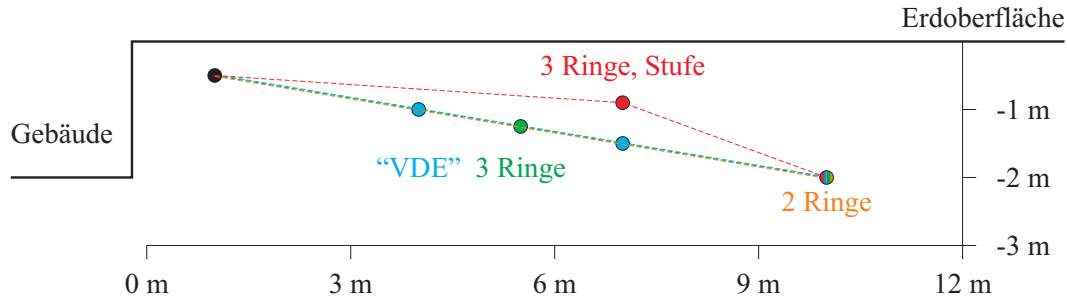
Als letzte Variation der Ringerder-Anordnungen wurden weniger als vier Ringe abweichend von den VDE-Vorgaben um das Gebäude platziert. Dabei wurden folgende Varianten untersucht, die auch in Abbildung 7.27 skizziert sind:

- „Stufe“: Gleiche Anordnung wie „Stufe 2“ des vorherigen Abschnittes, jedoch ist der zweite Ring von innen weggelassen. (Rot in Abbildung 7.27.)
- VDE-Anordnung, wobei die beiden mittleren Ringe zu einem Ring zusammengefasst wurden, der sowohl horizontal als auch vertikal mittig zwischen dem innersten und äußersten Ring liegt. (Grün in Abbildung 7.27.)

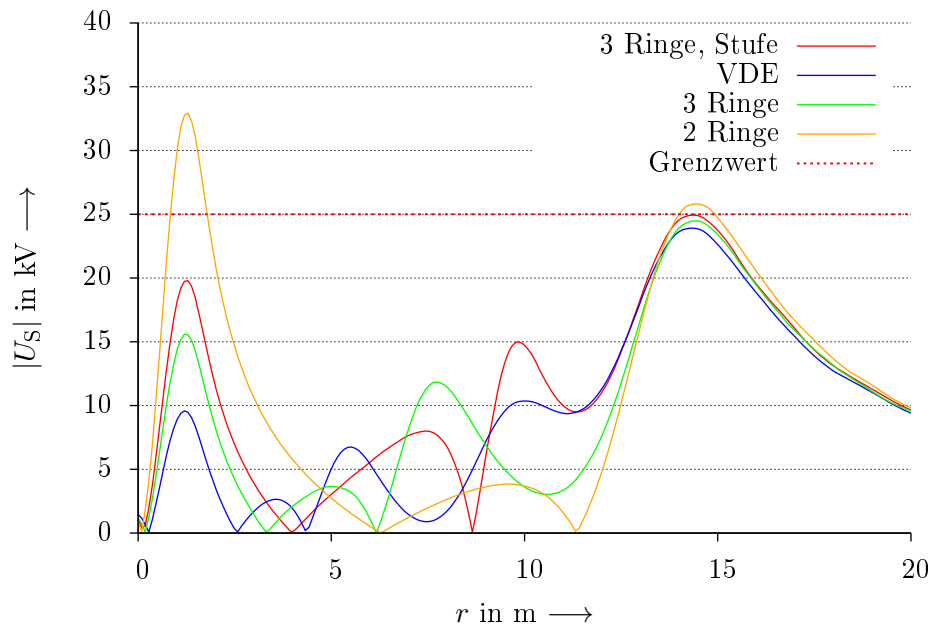


- VDE-Anordnung, wobei die beiden mittleren Ringe komplett weggelassen wurden. (Orange in Abbildung 7.27.)

Zum Vergleich ist auch hier die ursprüngliche VDE-Anordnung in Blau eingezeichnet.



**Abbildung 7.27.:** Planskizze der ungleichförmigen Verteilung der Erderringe bei weniger als vier Ringen



**Abbildung 7.28.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  bei  $I = 200\text{ kA}$  und weniger als vier Ringerdnen mit ungleichförmiger Verteilung der Ringe. ( $\rho_{\text{Erde}} = 1000\text{ }\Omega\text{m}$ )

Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.28 zu sehen, ebenfalls mit den Werten der ursprünglichen VDE-Anordnung zum Vergleich. Dabei ist unmittelbar auffällig, dass sich die Schrittspannungswerte bei  $r \approx 15\text{ m}$  der einzelnen Anordnungen nur unwesentlich unterscheiden. Die Unterschiede von Anordnung zu Anordnung zeigen

## 7. Simulation von Erdungsanlagen

sich viel mehr im Innenraum der Anlage ( $0\text{ m} < r < 15\text{ m}$ ). Besonders hervorzuheben ist dabei das Ergebnis der Anordnung mit lediglich zwei Ringerdern: Hier wird in unmittelbarer Gebäudenähe der angenommene Schrittspannungsgrenzwert deutlich überschritten. Es bleibt jedoch auch hervorzuheben, dass bei einer geschickten Platzierung von nur drei Ringen ein vergleichbar gutes Ergebnis wie mit der VDE-Anordnung erzielt werden kann und somit eine Kostenoptimierung möglich ist.

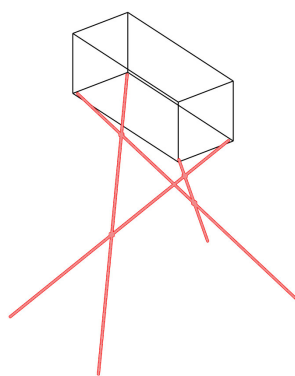
### 7.2.2. Nach innen geneigte Schrägerder

Wie einige bereits vorgestellte Simulationsergebnisse (z. B. einzelne Ringerder, siehe Kapitel 7.1.2) gezeigt haben, kann es nachteilig sein, aktive Erderteile unter dem Bereich, der später von Personen betreten werden kann, zu verlegen. Daher wurde in Abwandlung der Untersuchung von Schrägerdern in Abschnitt 7.1.4 auch untersucht, welche Schrittspannungen sich ergeben, wenn die Staberder nicht außen, vom Gebäude weg, sondern nach innen, zur Gebäudemitte hin geneigt sind und somit nicht unterhalb des Bereiches um das Gebäude herum verlegt sind. Dazu wurde eine entsprechende Simulationsreihe durchgeführt, wobei pro Gebäudeecke ein Staberder verwendet wurde. Das obere Ende der Erderstäbe liegt dabei analog zu Abschnitt 7.1.4 ebenfalls auf Kellerniveau (2 m unter OKG). Bei der Gebäudegröße  $10\text{ m} \times 50\text{ m}$  wurden außerdem in der bekannten Weise an der Längsseite zusätzliche Erder im 10-m-Raster verwendet. Ein Neigungswinkel  $\alpha$  gegenüber der Vertikalen von  $45^\circ$  führt jedoch bei den beiden kleineren Gebäudegrößen dazu, dass sich die Tiefenerder unter der Gebäudemitte schneiden, was bei einer praktischen Ausführung zu Problemen führen würde. Daher wurden bei den betroffenen Gebäudegrößen teilweise mehrere zusätzliche Variationen simuliert, bei denen die Erderstangen nur so weit geneigt waren, dass sie sich in der Mitte gerade nicht schneiden. Tabelle 7.3 gibt einen Überblick über die dazu verwendeten Neigungswinkel  $\alpha$  gegenüber der Vertikalen (Nadirwinkel) sowie den Drehwinkel  $\beta$  gegenüber der Gebäude(längs)seite (Azimut). Die Abbildung 7.29 zeigt zur Verdeutlichung einige der Ausführungen in *COMSOL*.

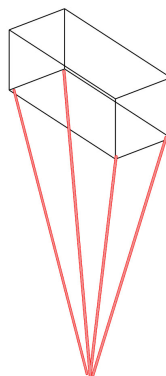
Die Ergebnisse für einen Blitzstrom von 200 kA sind in den Abbildungen 7.30–7.33 dargestellt, wobei hier zum besseren Vergleich auch die Ergebnisse der nach außen gerichteten Schrägerder gemäß Abschnitt 7.1.4 nochmals mit aufgetragen sind. Die Ergebnisse der übrigen Spannungswerte befinden sich im Anhang B.3 in den Abbildungen B.51–B.57. Dabei fällt auf, dass die Schrittspannungen bei nach innen geneigten Schrägerdern durchweg höher sind als bei nach außen geneigten Schrägerdern. Sofern also nicht Platzprobleme oder Ähnliches dagegen stehen, wären im direkten Vergleich in der Praxis nach außen geneigte Schrägerder vorzuziehen.

**Tabelle 7.3.:** Nadirwinkel  $\alpha$  und Azimut  $\beta$  der verschiedenen Ausführungen nach innen gerichteter Schrägerder

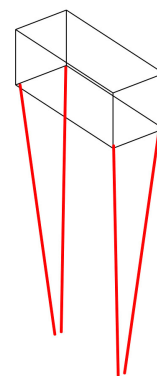
Gebäudegröße	Ausführung	$\alpha$	$\beta$
2 m $\times$ 2 m	6 m, „kreuzend“	45°	45°
2 m $\times$ 2 m	6 m, „nicht kreuzend“	10°	45°
2 m $\times$ 5 m	6 m, „kreuzend“	45°	45°
2 m $\times$ 5 m	6 m, „nicht kreuzend, steil“	10°	45°
2 m $\times$ 5 m	6 m, „nicht kreuzend, flach“	23°	20°
10 m $\times$ 10 m	6 m	45°	45°
10 m $\times$ 50 m	6 m	45°	90°/45°
2 m $\times$ 2 m	9 m, „kreuzend“	45°	45°
2 m $\times$ 2 m	9 m, „nicht kreuzend“	7°	45°
2 m $\times$ 5 m	9 m, „kreuzend“	45°	45°
2 m $\times$ 5 m	9 m, „nicht kreuzend, steil“	7°	45°
2 m $\times$ 5 m	9 m, „nicht kreuzend, flach“	16°	20°
10 m $\times$ 10 m	9 m	45°	45°
10 m $\times$ 50 m	9 m	45°	90°/45°



(a) „kreuzend“



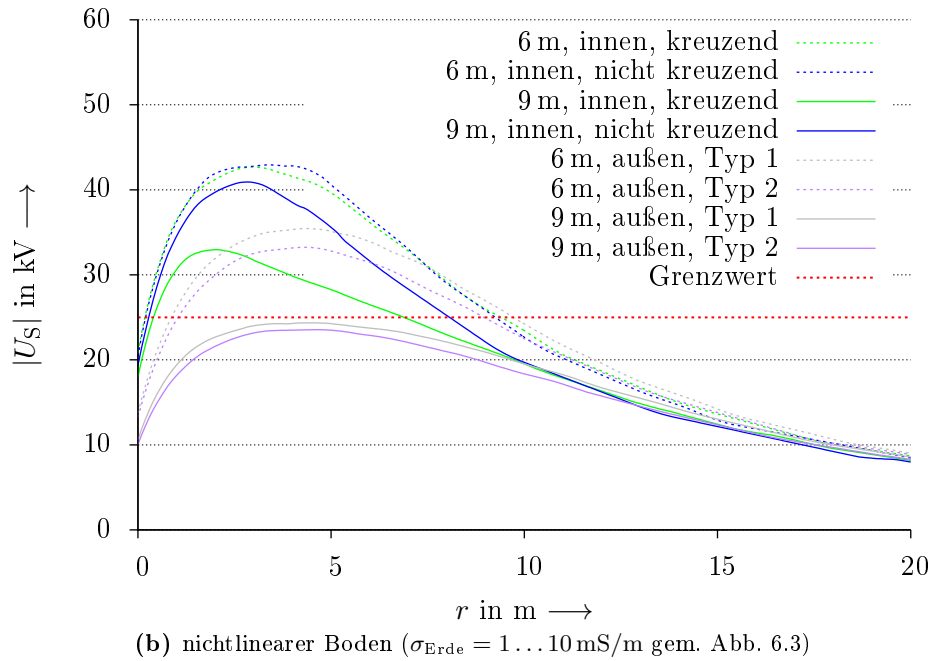
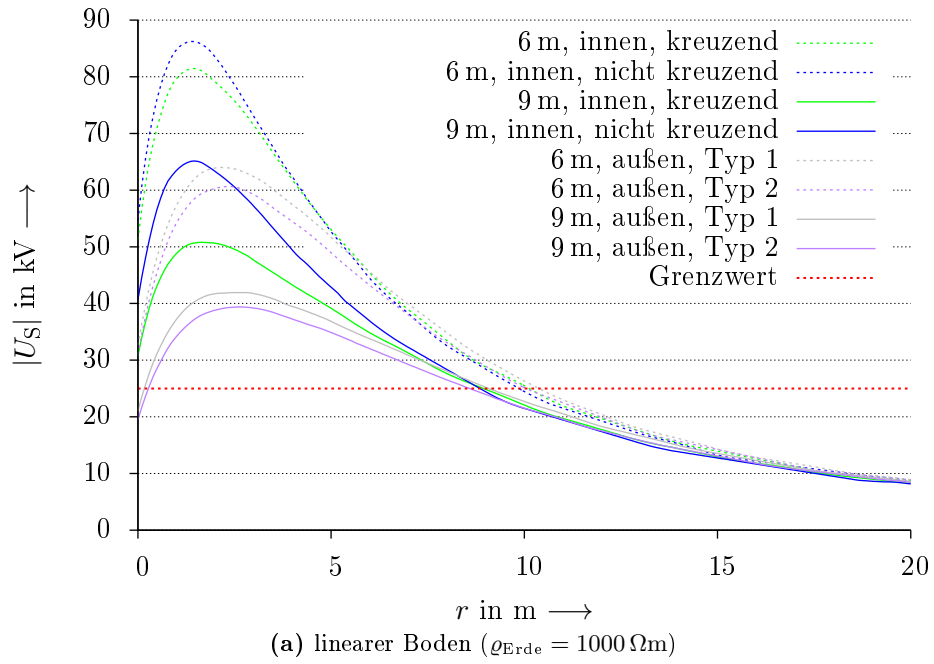
(b) „nicht kreuzend, flach“



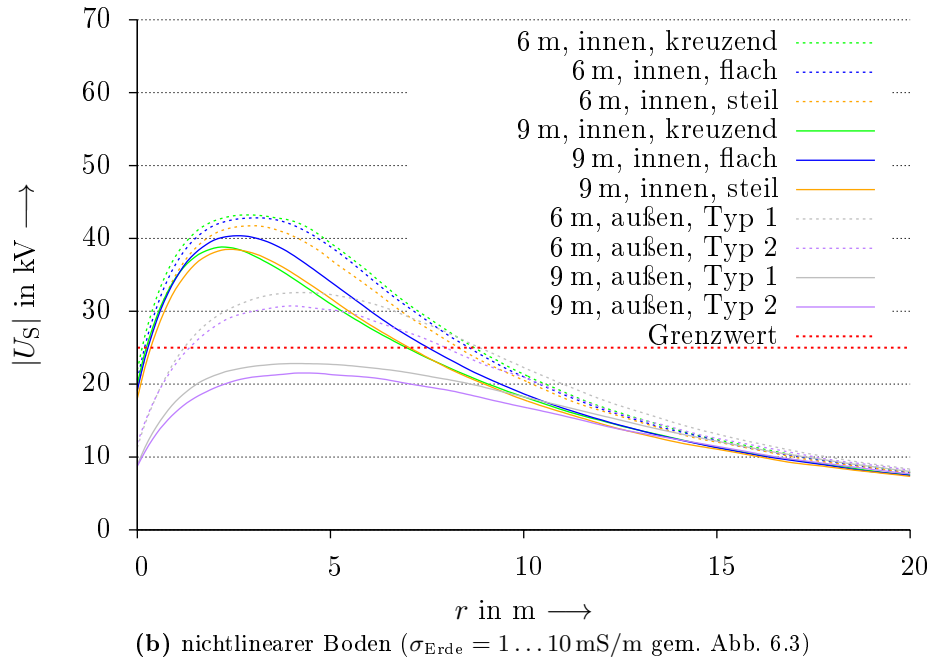
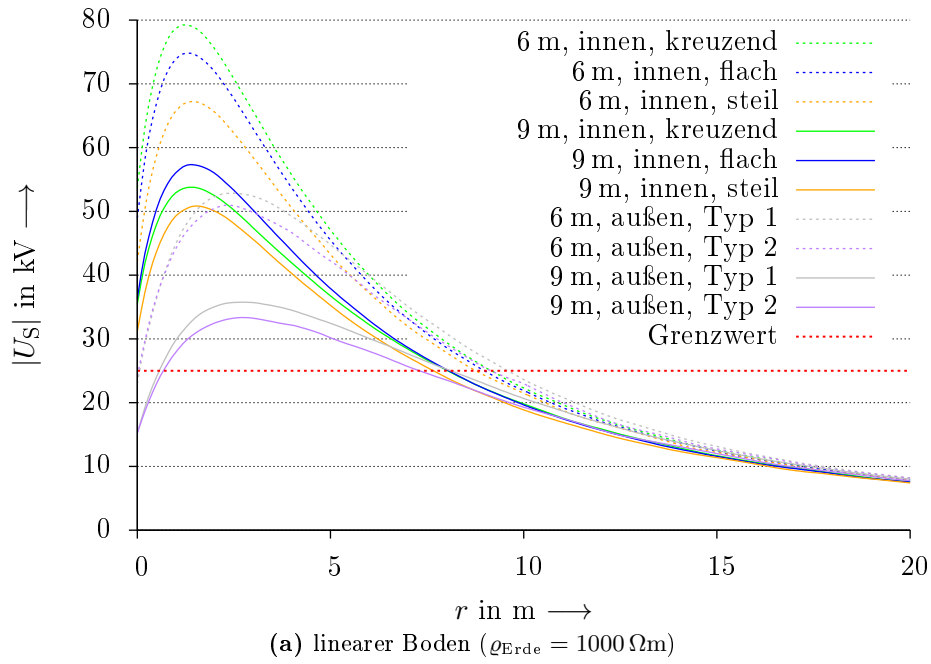
(c) „nicht kreuzend, steil“

**Abbildung 7.29.:** Verschiedene Ausführungsvarianten von nach innen geneigten Schrägerdern am Beispiel der Gebäudegröße 2 m  $\times$  5 m und einer Erderlänge von 9 m. Die Erderstäbe sind rot eingefärbt.

## 7. Simulation von Erdungsanlagen

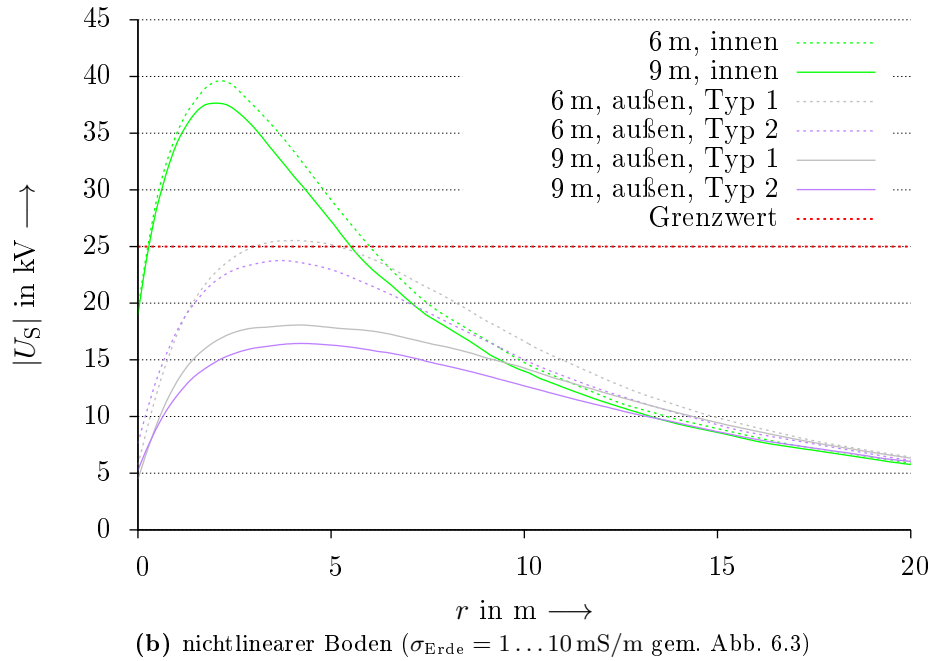
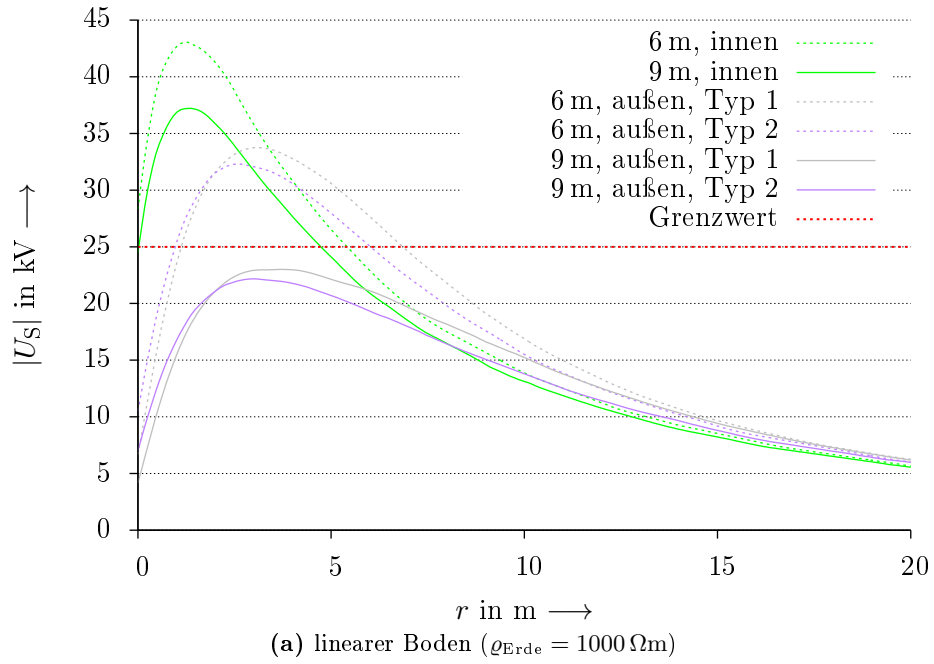


**Abbildung 7.30.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  bei  $I = 200 \text{ kA}$  und nach innen gerichteten Schrägerdern verschiedener Längen

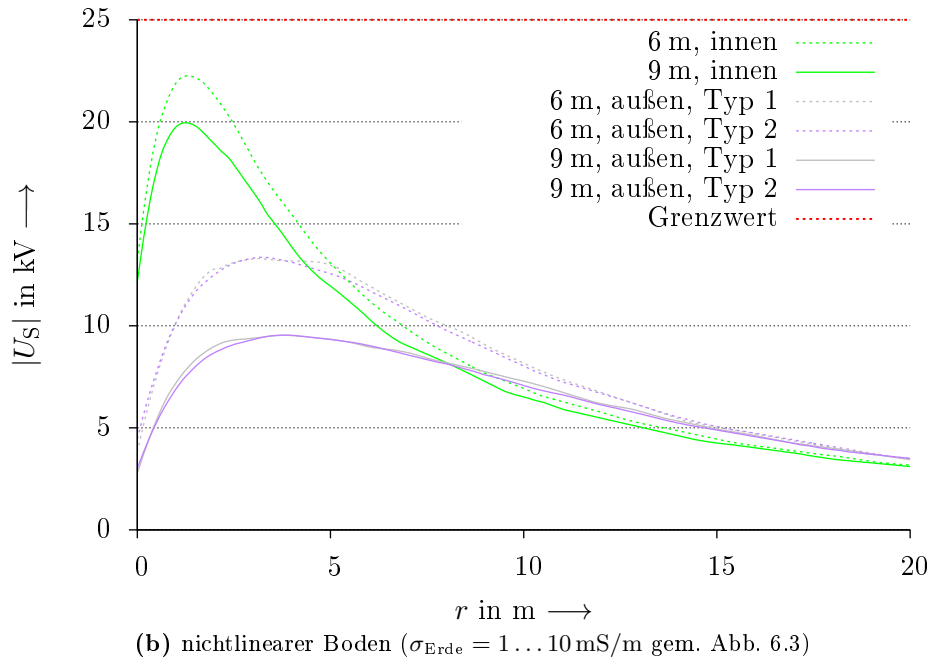
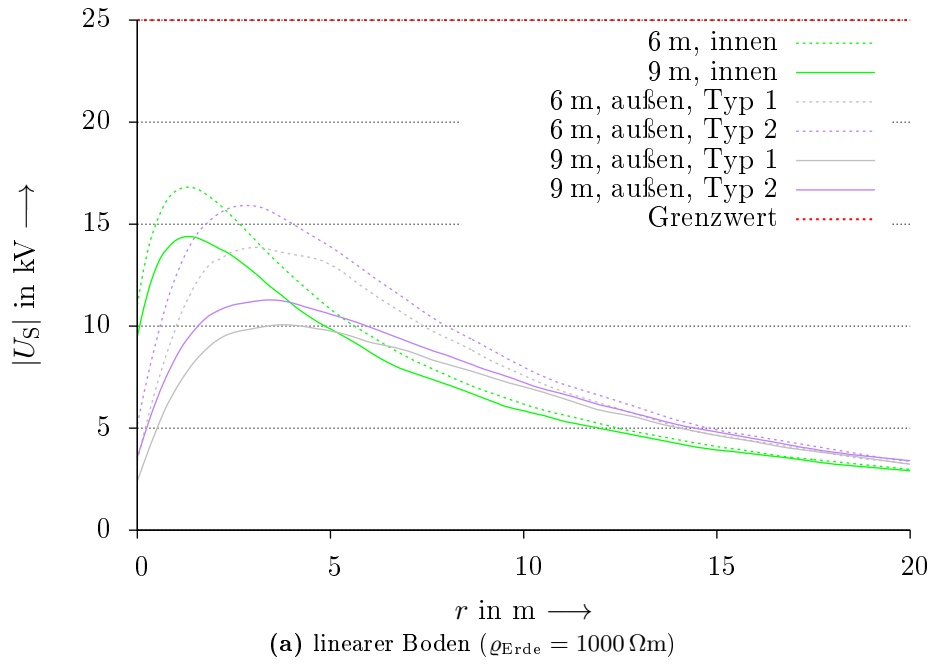


**Abbildung 7.31.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  bei  $I = 200 \text{ kA}$  und nach innen gerichteten Schrägerdern verschiedener Längen

## 7. Simulation von Erdungsanlagen



**Abbildung 7.32.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  bei  $I = 200 \text{ kA}$  und nach innen gerichteten Schrägerdern verschiedener Längen



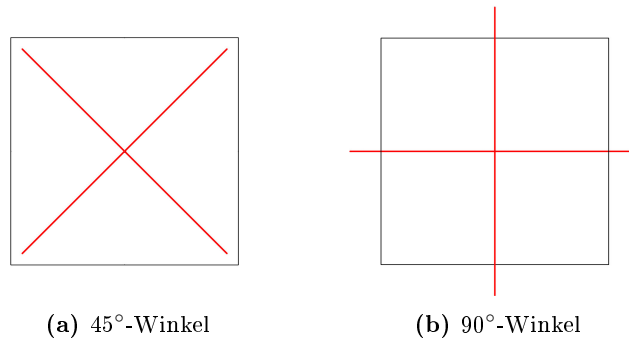
**Abbildung 7.33.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m}$  bei  $I = 200 \text{ kA}$  und nach innen gerichteten Schrägerdern verschiedener Längen

### 7.2.3. Sternförmige Erder

Als weitere Variante schräg eingetriebener Staberder wurden Schrägerder untersucht, die wie die Erderstäbe in Abschnitt 7.1.4 nach außen geneigt sind, dabei aber nicht in den Gebäudeecken, sondern alle vier in der Gebäudemitte positioniert sind („Sternerder“). Diese Variante hätte den Vorteil, dass die Erderstangen – je nach konkreter Ausführung – gar nicht oder nur wenig über den Gebäudegrundriss hinausragen würden. Somit wäre ein Einsatz auch unter räumlich sehr beengten Verhältnissen möglich. Hierbei wurden insgesamt vier Untervarianten untersucht:

- Jeweils eine Erderlänge von 6 m und 9 m
- Jeweils eine Ausrichtung der Erder im 45°- und 90°-Winkel zu den Gebäude-seiten. Abbildung 7.34 verdeutlicht dies.

Beim Gebäude der Größe 10 m × 50 m wurden insgesamt fünf Vierersterne in gleichmäßigem Abstand unter dem Gebäude platziert, wie Abbildung 7.35 zeigt.

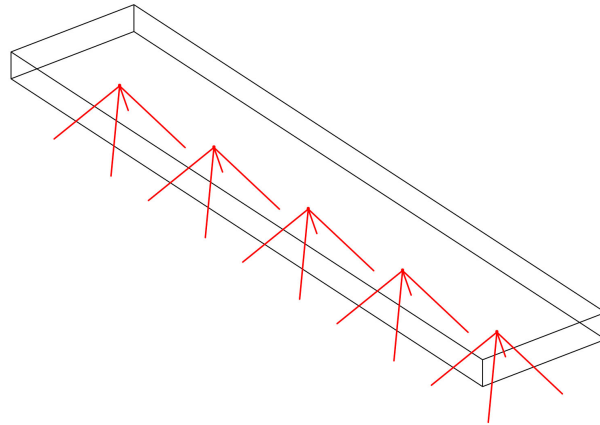


**Abbildung 7.34.:** Planskizze in Draufsicht der verschiedenen Ausführungsvarianten von Sternernern von der Gebäudemitte ausgehend am Beispiel der Gebäudegröße 10 m × 10 m und einer Erderlänge von 9 m. Die Erderstangen sind rot eingefärbt.

Da sich bei der Verwendung von Sternernern keine elektrisch aktiven Erderteile unmittelbar an den Ecken der Gebäude befinden, ergibt sich auf der Erdoberfläche eine andere Potentialverteilung. Wie Voruntersuchungen (aus Platzgründen hier nicht dargestellt) ergeben haben, treten die höchsten Schrittspannungen daher hier nicht entlang der 45°-Achse von den Gebäudeecken aus auf, sondern entlang der Mittelsenkrechten auf der Gebäude(längs)seite – entsprechend der Achse „Mitte“ in den Abbildungen 6.16 und 6.19.

Die Ergebnisse für einen Blitzstrom von 200 kA sind in den Abbildungen 7.36–7.39 wiedergegeben, wobei auch hier zum Vergleich die Schrittspannungen von nach außen geneigten Schrägerdern gemäß Abschnitt 7.1.4 mit eingetragen sind. Die sich ergebenden Schrittspannungen für die übrigen Blitzströme sind in den Abbildungen

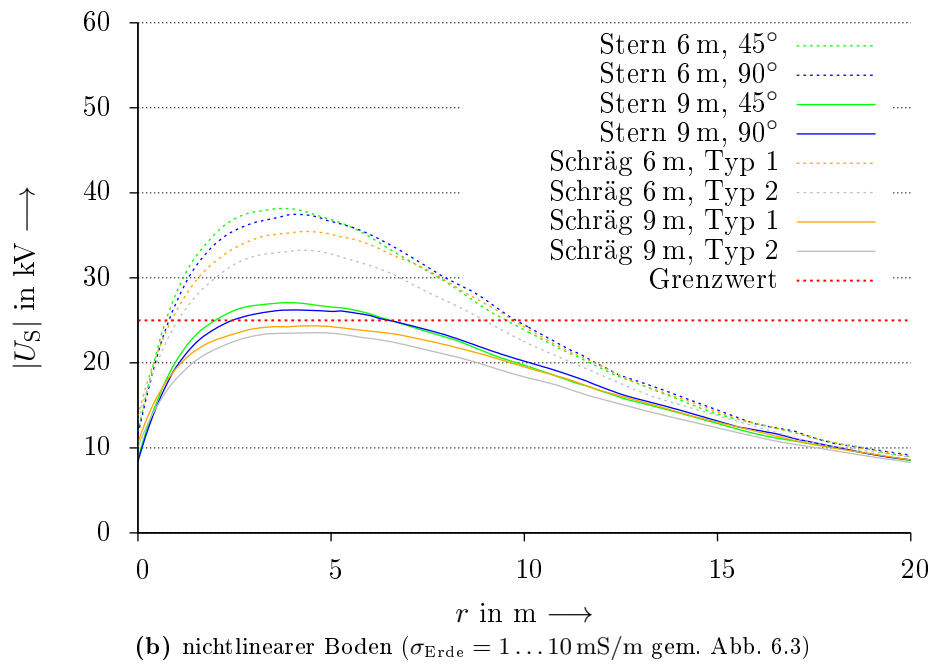
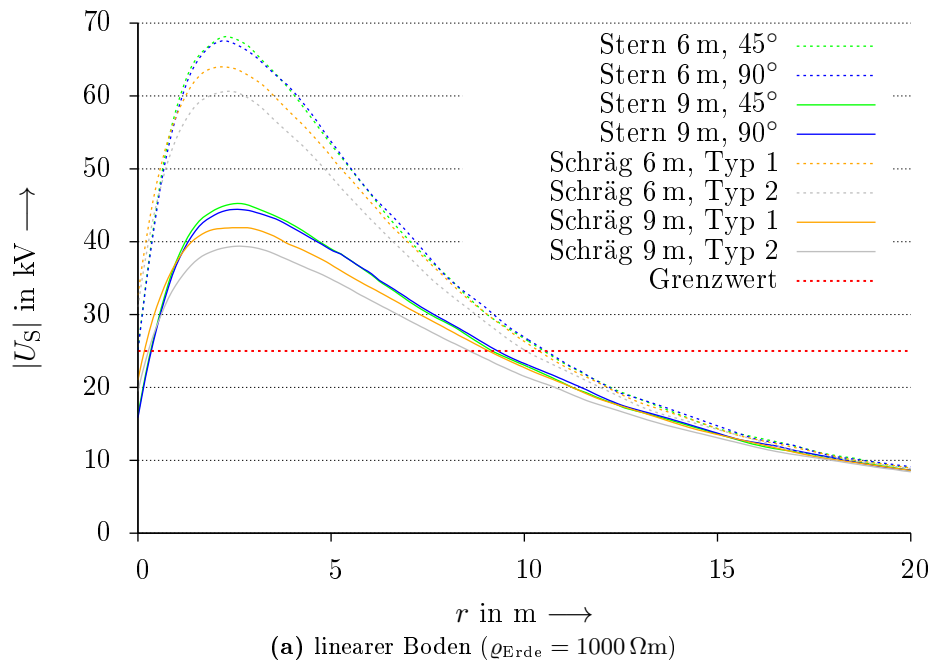




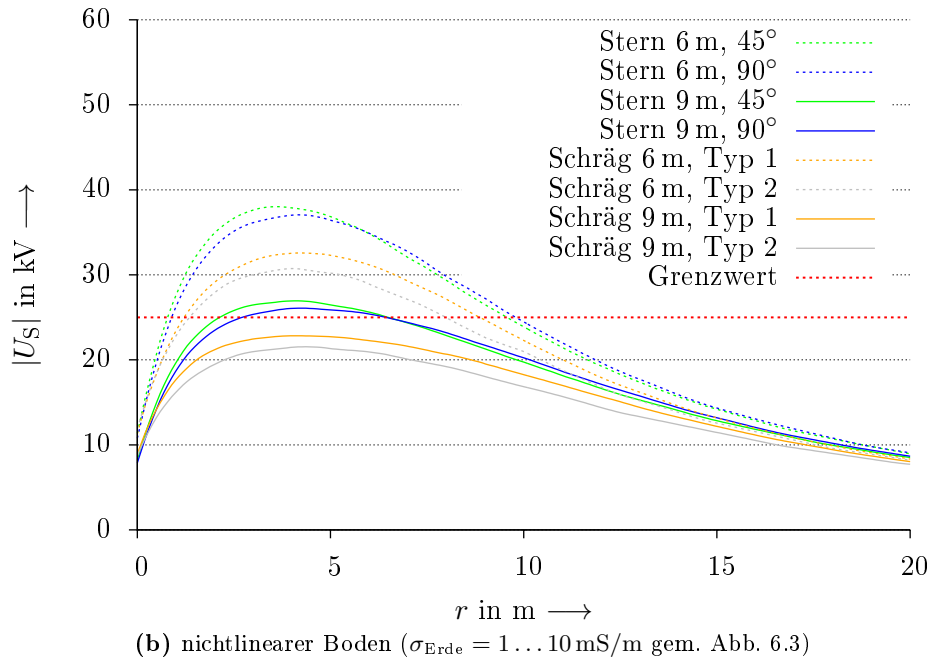
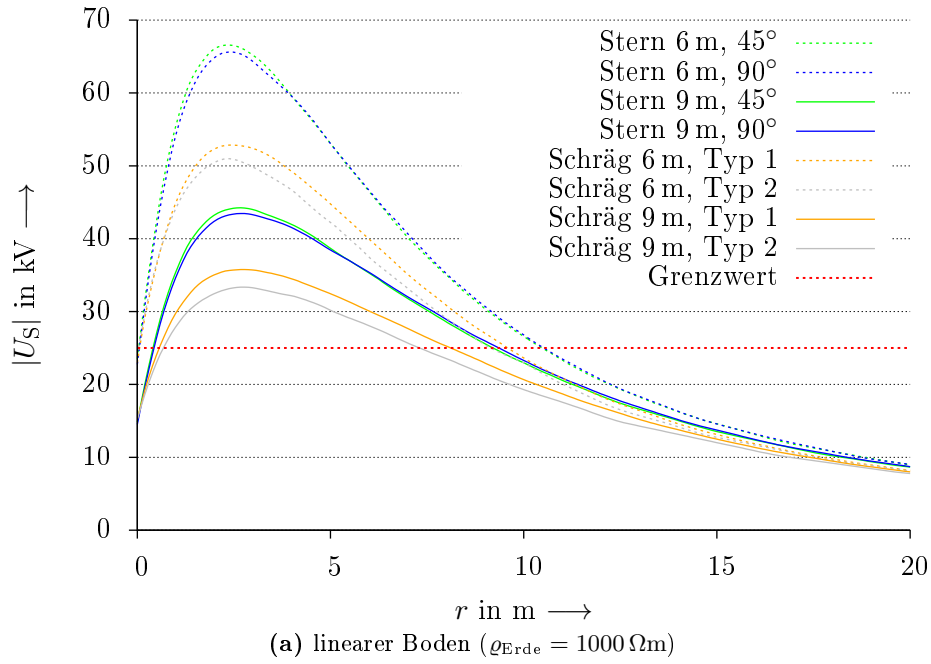
**Abbildung 7.35.:** Ausführung von Sternerdern bei der Gebäudegröße  $10\text{ m} \times 50\text{ m}$  am Beispiel der Erderlänge  $6\text{ m}$  und der Ausrichtung „ $45^\circ$ “. Die Erderstangen sind rot eingefärbt.

B.58–B.65 zu finden. Dabei ist zu erkennen, dass die Schrittspannungen der Sternerder – mit Ausnahme des Gebäudes  $10\text{ m} \times 50\text{ m}$  – über denjenigen der nach außen gerichteten Schrägerder liegen. Da sich zudem bei einer eventuellen praktischen Umsetzung dieses Konzeptes die isolierte Zuführung der Ableitungen zum Fußpunkt des Sternerders beziehungsweise der Sternerder als schwierig erwies (eine nicht isolierte Zuführung hätte völlig andere Schrittspannungen um das Gebäude zur Folge), ergibt sich, dass Sternerder in der hier vorgestellten Ausführung nicht praktikabel sind.

## 7. Simulation von Erdungsanlagen

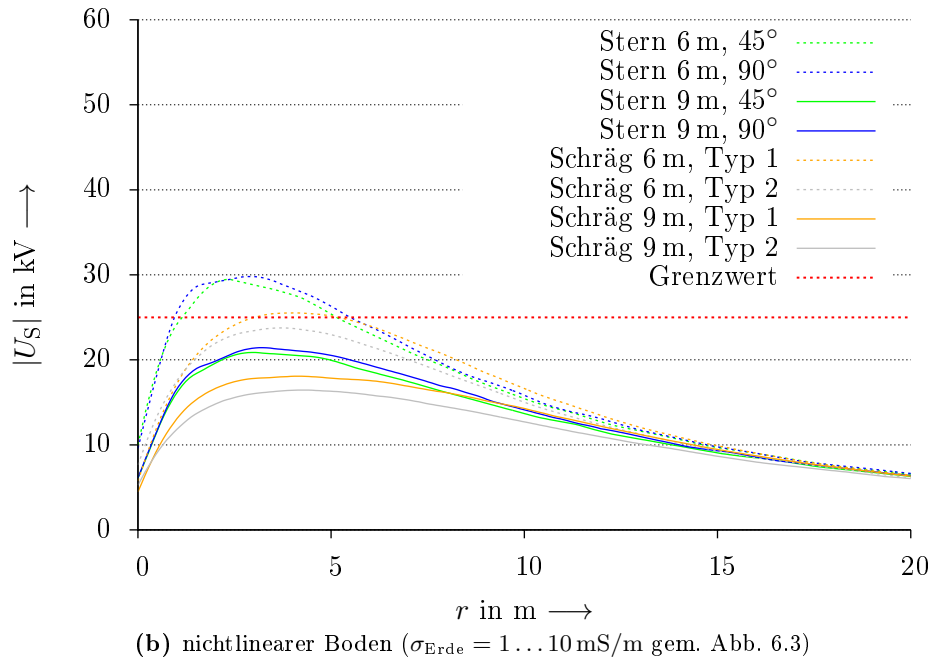
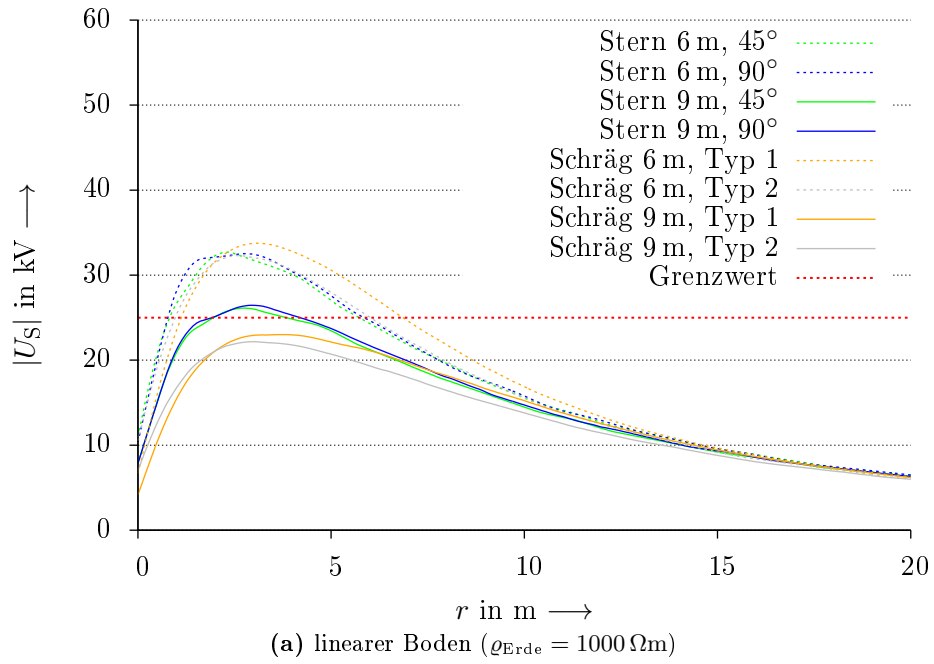


**Abbildung 7.36.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  bei  $I = 200 \text{ kA}$  und Sternerder verschiedener Längen und Ausführungen

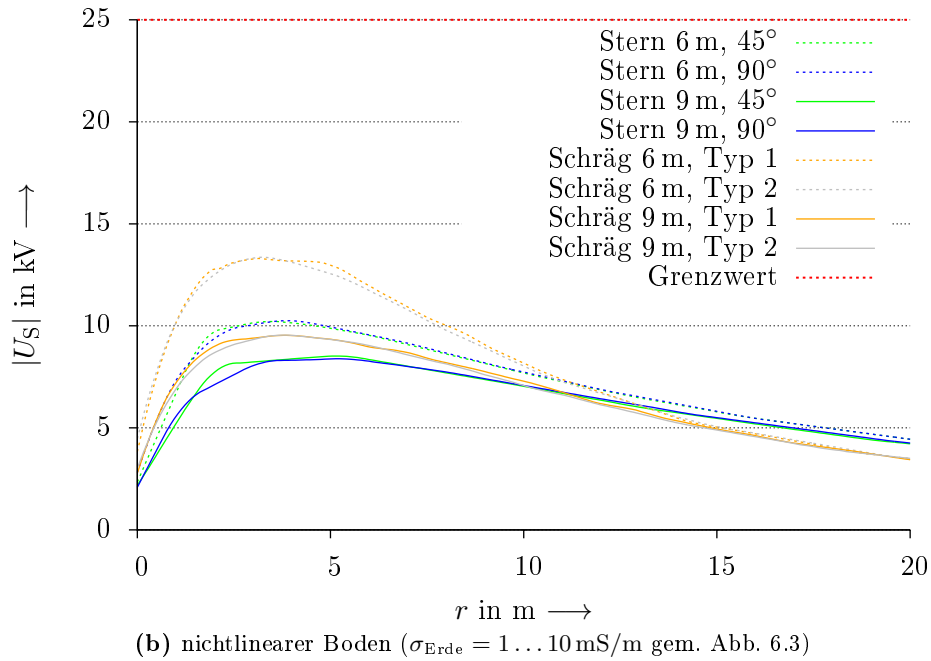
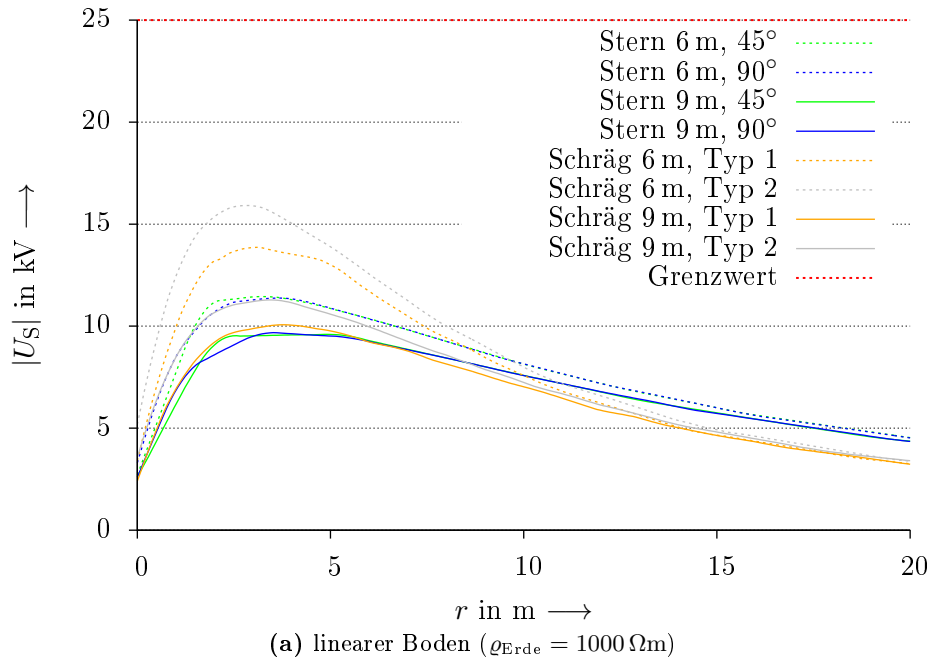


**Abbildung 7.37.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  bei  $I = 200 \text{ kA}$  und Sternerder verschiedener Längen und Ausführungen

## 7. Simulation von Erdungsanlagen



**Abbildung 7.38.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  bei  $I = 200 \text{ kA}$  und Sternerder verschiedener Längen und Ausführungen

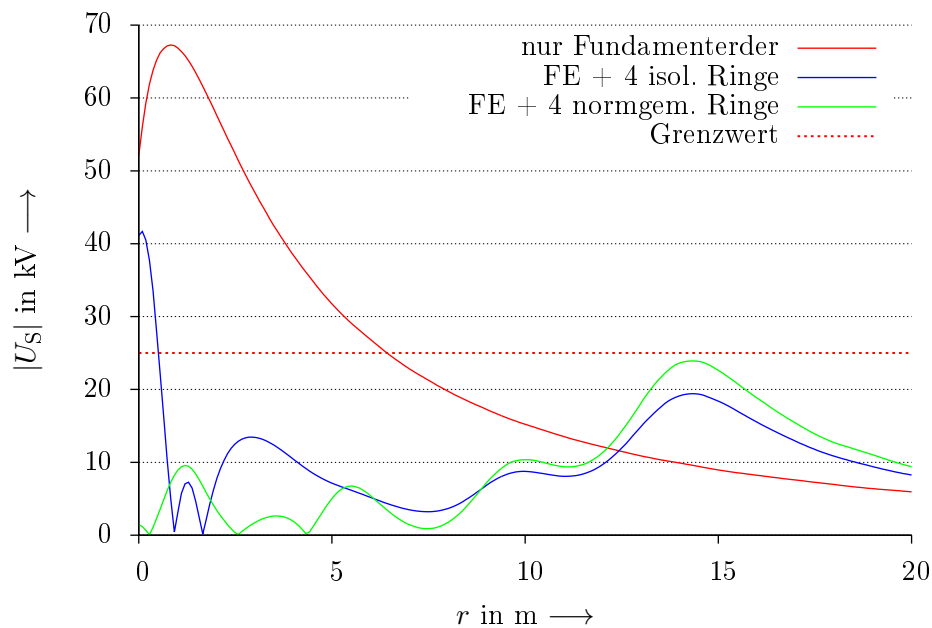


**Abbildung 7.39.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m}$  bei  $I = 200 \text{ kA}$  und Sternerder verschiedener Längen und Ausführungen

#### 7.2.4. Elektrisch nicht angebundene Ringerder

Da, wie in Abschnitt 7.1.2 beschrieben, bei normgemäßen Ringerderanlagen die höchsten Schrittspannungen am Rand der Anlage auftreten, stellt sich die Frage, ob die Schrittspannungsverteilung günstiger ausfällt, wenn vier Ringerder zwar vorhanden und elektrisch untereinander verbunden sind, es jedoch keine elektrische Anbindung an die übrige Blitzschutzanlage gibt – die Ringe also sozusagen isoliert von der restlichen Erdungsanlage ausgeführt sind und dadurch ein schwebendes („floating“) Potential annehmen.

Diese Untersuchung wurde lediglich an einem Gebäude der Größe  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  und auch nur für linearen Boden durchgeführt. Die Ergebnisse sind hier aus Platzgründen nur für  $I = 200\text{ kA}$  gezeigt und in Abbildung 7.2.4 zu sehen. Als Resultat ist zu erkennen, dass durch die elektrisch nicht angebundenen Ringerder in der Tat die Schrittspannungen am Rande der Anlage etwas sinken ( $r \approx 15\text{ m}$ ), im Gegenzug jedoch unmittelbar am Gebäude deutlich ansteigen – im vorliegenden Fall sogar über den angenommenen Grenzwert. Der Grund hierfür liegt darin, dass die isolierten Ringerder ein relativ niedriges Potential des Erdbodens weiter entfernt vom Gebäude annehmen und dieses sozusagen an das Gebäude herantragen. Dadurch ergibt sich eine große Potentialdifferenz zwischen dem Fundamenterder und dem innersten Ringerder, was wiederum zu hohen Schrittspannungen in diesem Bereich führt.

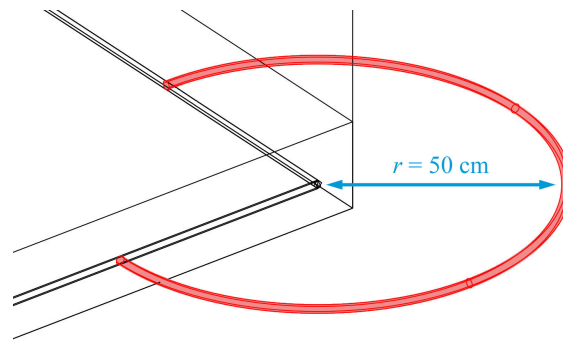


**Abbildung 7.40.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  bei  $I = 200\text{ kA}$  und Verwendung eines Fundamenterders (FE) alleine, zusammen mit vier Erderringen gemäß DIN EN 62305-3 sowie vier elektrisch nicht angebundenen Erderringen („isol.“). ( $\varrho_{\text{Erde}} = 1000\text{ }\Omega\text{m}$ )

Die hohen Schrittspannungen im gebäudenahen Bereich ließen sich in der Praxis zwar relativ gut mit einem isolierenden Bodenbelag abmildern (es wäre ein gut 1 m breiter Streifen rund um das Gebäude notwendig), demgegenüber steht jedoch nur eine vergleichsweise geringe Absenkung der Schrittspannung im Bereich  $r \approx 15$  m. Daher kann dieses Konzept in der Praxis bestenfalls nur in wenigen Spezialfällen (nämlich dann, wenn die Schrittspannungen bei einer normgemäßen Ringerderanlage am äußeren Rand nur wenig über dem Grenzwert liegen) als geeignete Lösung angesehen werden.

### 7.2.5. Leiterbögen an den Ecken eines Fundamenterders

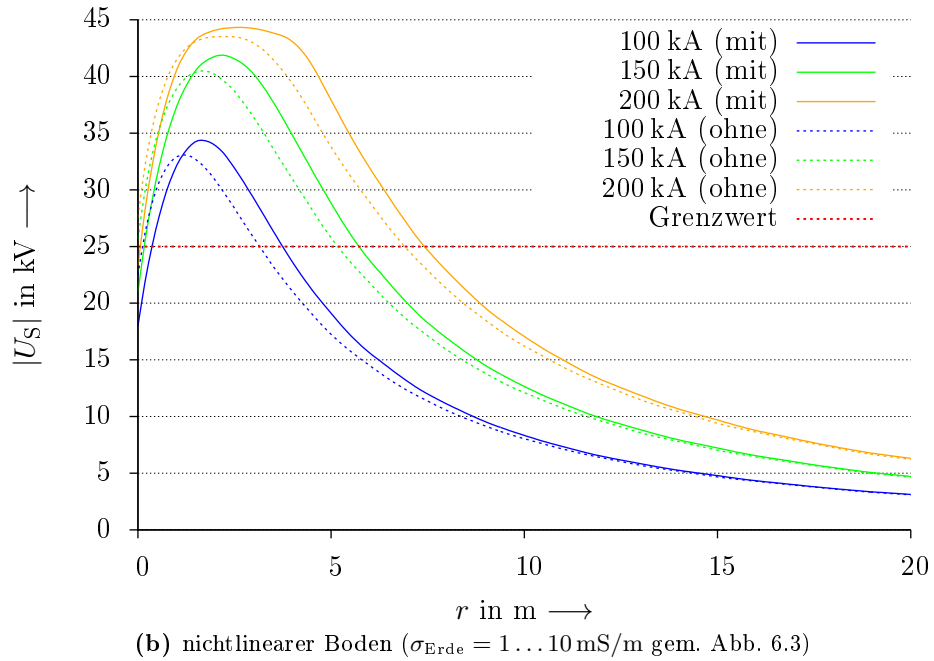
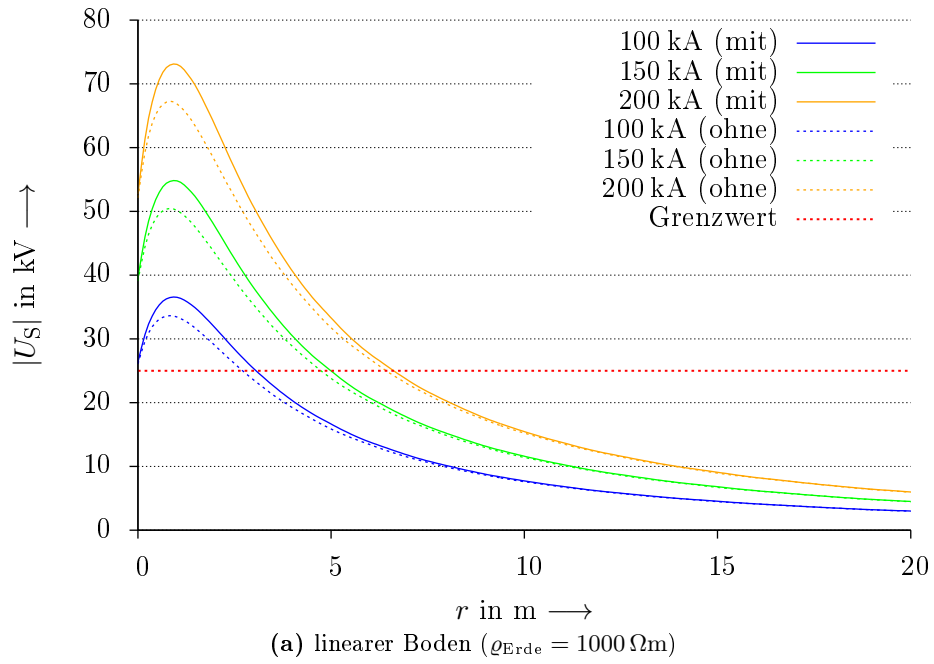
Da bei der Verwendung eines Fundamenterders die höchsten Schrittspannungen an den Ecken des Gebäudes auftreten (vgl. Kapitel 6.2.4) und der Fundamenterder in den Ecken nur einen sehr geringen äußeren Krümmungsradius hat (im Simulationsmodell  $r = 1$  cm), liegt aus hochspannungstechnischer Erfahrung heraus die Idee nahe, die Schrittspannungen durch eine Vergrößerung des Erderradius an den Ecken zu verringern. Dies wurde untersucht, indem der Fundamenterder an jeder Gebäudeecke um einen zusätzlichen Erdleiter in Dreiviertel-Kreisform und einem Radius von 50 cm gemäß Abbildung 7.41 ergänzt wurde.



**Abbildung 7.41.:** Eckbogen am Fundamenterder zur Potentialsteuerung im *COM-SOL*-Modell

Die Ergebnisse sind für ein Gebäude von  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  in Abbildung 7.42 und für alle übrigen Gebäudegrößen in den Abbildungen B.66–B.68 in Anhang B.3 zu sehen. Im direkten Vergleich wird dabei deutlich, dass die Schrittspannung bei Verwendung der Erderbögen durchweg höher oder zumindest gleichauf mit den Schrittspannungen bei einem einfachen Fundamenterder liegen. Dieses Konzept eignet sich somit nicht zur praktischen Umsetzung. Zur näheren Begründung der höheren Schrittspannung bei Verwendung der zusätzlichen Leiterbögen siehe Kapitel 8.

## 7. Simulation von Erdungsanlagen

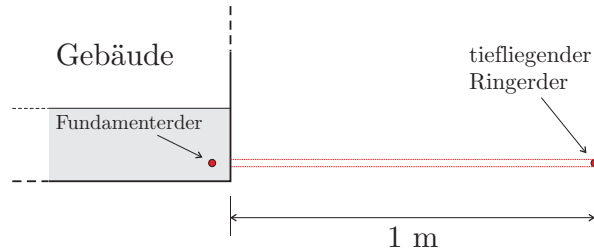


**Abbildung 7.42.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  bei einem Fundamenterder mit und ohne zusätzliche Leiterbögen an den Ecken



### 7.2.6. Tiefliegender Ringerder

Da sich beim Konzept der Leiterbögen an den Ecken eines Fundamenterders (vgl. vorheriges Kapitel 7.2.5) höhere Schrittspannungen einstellen als bei einem Fundamenterder alleine, stellt sich die Frage, wie sich die Schrittspannungen verhalten, wenn die Länge der unmittelbar erdfühligem Erderleiter vergrößert wird. Dazu wurde der Fundamenterder um einen einzelnen Ringerder ergänzt, der sich in 1 m Abstand vom Gebäude und in derselben Tiefe wie der Fundamenterder<sup>2</sup> befindet. Abbildung 7.43 illustriert die Positionierung.



**Abbildung 7.43.:** Planskizze (Seitenansicht) zur Positionierung des tiefliegenden Ringerders

Das Ergebnis dieser Simulation, die ausschließlich für ein Gebäude  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ ,  $I = 200\text{ kA}$  und linearen Boden durchgeführt wurde, ist in Abbildung 7.44 zu sehen. In dieser Abbildung sind zu Vergleichszwecken noch die Graphen weiterer Fundamenterder-Varianten eingezeichnet:

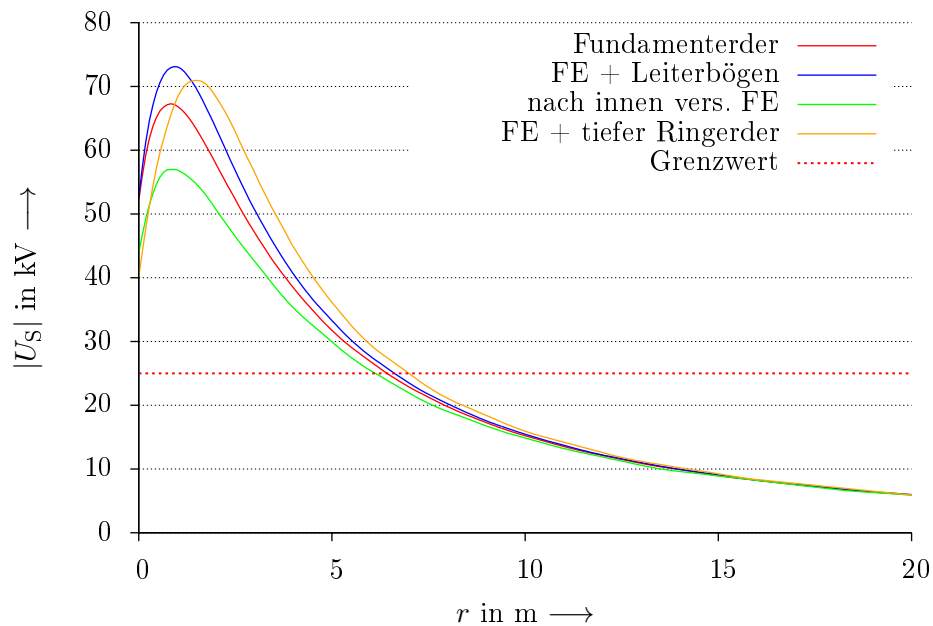
- Ein Fundamenterder entsprechend Abschnitt 7.1.1 ohne weitere Modifikationen,
- ein Fundamenterder mit zusätzlichen Leiterbögen an den Ecken entsprechend Abschnitt 7.2.5 sowie
- ein Fundamenterder, der gegenüber seiner normalen Position um 50 cm in Richtung Gebäudemitte verschoben ist (entsprechend 55 cm seitlicher Betonüberdeckung – vgl. Abbildung 7.45).

Zur letztgenannten Variante ist anzumerken, dass sie lediglich aus theoretischen Überlegungen heraus zu Vergleichszwecken dient, wie in Kapitel 8 deutlich wird. Für die Praxis ist diese Variante nicht relevant, da hier die Fundamentplatte in aller Regel mit einer Bewehrung aus Baustahl ausgestattet ist, die sich bis dicht an den Rand der Fundamentplatte erstreckt und zur Verteilung des Blitzstromes beiträgt (siehe hierzu auch Kapitel 6.2.2).

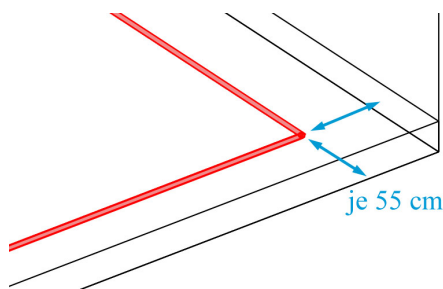
In Abbildung 7.44 ist zu erkennen, dass trotz der deutlich größeren Erder-Gesamtlänge der tiefliegende Ringerder Schrittspannungen liefert, die nur wenig über

<sup>2</sup>2 m Kellertiefe abzüglich 5 cm Betonüberdeckung nach unten entsprechend 1,95 m unter OKG

## 7. Simulation von Erdungsanlagen



**Abbildung 7.44.:** Schrittspannungen an einem Gebäude  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  für  $I = 200\text{ kA}$  und Verwendung eines Fundamenterders (FE) in verschiedenen Abwandlungen sowie eines tiefliegenden Ringerders. Nähere Erläuterungen siehe Haupttext.

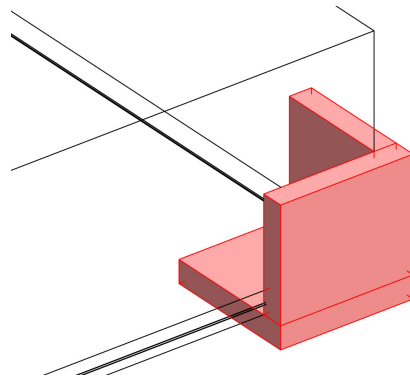


**Abbildung 7.45.:** Nach innen versetzter Fundamenterder

denjenigen des Fundamenterders mit zusätzlichen Leiterbögen liegen. Insbesondere sind auch diese Schrittspannungen immer noch höher als diejenigen eines Fundamenterders alleine. Niedrigere Schrittspannungen liefert lediglich der nach innen versetzte Fundamenterder, wobei hier die im vorherigen Absatz genannten Einschränkungen zu beachten sind.

### 7.2.7. Lokale Isolierungen an den Ecken eines Fundamenterders

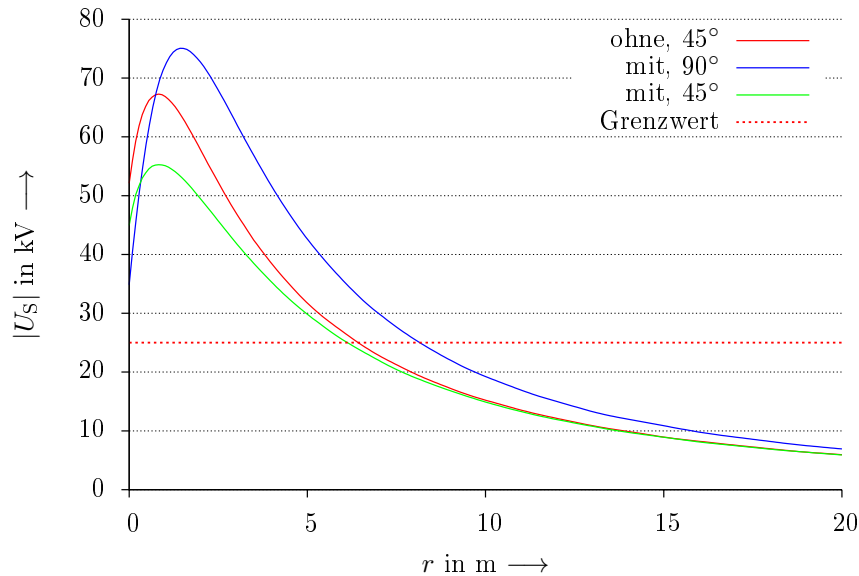
Da sich die zuvor vorgestellten zusätzlichen Erderbögen an Fundamenterdern als kontraproduktiv erwiesen haben, wurde untersucht, ob stattdessen das Gegenteil, also die gezielte Isolierung der Ecken an einem Fundamenterder eine Verbesserung bringt. Diese Isolierung soll das elektrische Feld, das an den Gebäudeecken besonders stark ist, an diesen kritischen Stellen verringern. In der Simulation wurde dies wie folgt umgesetzt: An jeder Gebäudeecke wurde ein Element eingefügt, das sowohl beide Wände als auch den Boden bedeckt. Die Innenkantenlänge beträgt 1 m, die Materialstärke 20 cm. Abbildung 7.46 zeigt eines dieser Elemente in *COMSOL*. Als Leitfähigkeit wurde mit  $\sigma = 1^{-14} \text{ S/m}$  ( $\rho = 1^{14} \Omega\text{m}$ ) ein sehr guter Isolator angenommen, was im Bereich der Materialwerte von PVC liegt.



**Abbildung 7.46.:** Ausführung einer Eckenisolierung (rot gefärbt) in *COMSOL*

Die Simulationen wurden dabei ausschließlich für ein Gebäude der Größe  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ , linearen Boden und einen Blitzstrom von  $200 \text{ kA}$  durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 7.47 zu sehen. Dabei wurden für diese Darstellung die Schrittspannungen bei Verwendung von isolierten Ecken einmal entlang der bekannten  $45^\circ$ -Achse (Graph „mit,  $45^\circ$ “ in Abbildung 148) und einmal entlang der Mittelsenkrechten auf einer Gebäudewand (Graph „mit,  $90^\circ$ “, vgl. Abbildung 6.16) ausgewertet. Es fällt auf, dass die Verwendung von isolierten Ecken tatsächlich die Schrittspannungen entlang der  $45^\circ$ -Achse senken. Jedoch reduziert die Verwendung dieser Ecken die effektiv nutzbare Länge des Fundamenterders (in der hier dargestellten Konstellation um 20 %), sodass im Gegenzug die Schrittspannungen in der Mitte der Gebäudewände steigt – dies sogar über die höchsten Werte bei einem einfachen Fundamenterder ohne isolierte Ecken. Somit muss auch dieses Konzept als ungeeignet eingestuft werden.

## 7. Simulation von Erdungsanlagen



**Abbildung 7.47.:** Schrittspannungen entlang unterschiedlicher Auswerteachsen bei der Gebäudegröße  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ , linearem Boden ( $\varrho = 1000\ \Omega\text{m}$ ) und Blitzstrom  $200\text{ kA}$  mit einem Fundamenterder mit isolierten Ecken sowie zum Vergleich ohne isolierte Ecken

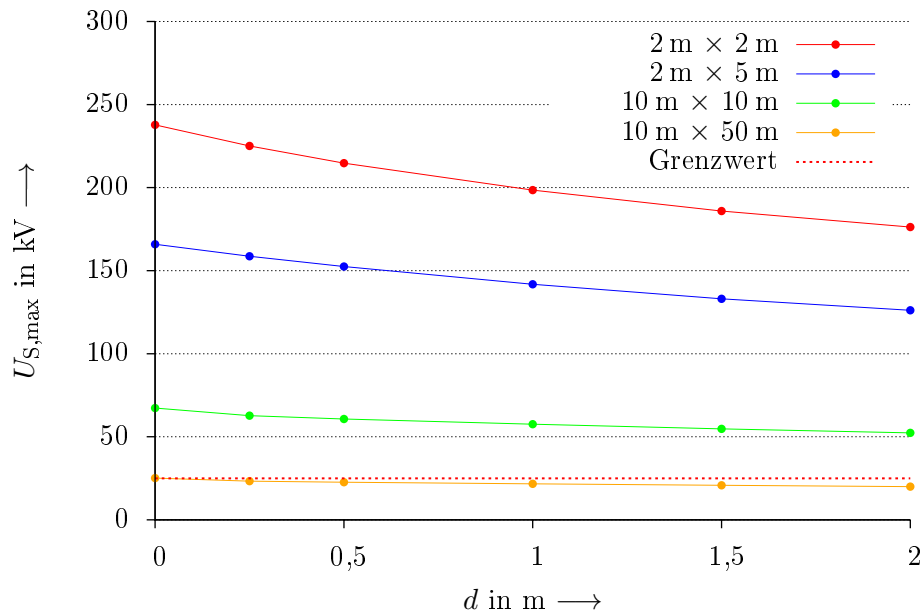
### 7.2.8. Bodenverbessernde Maßnahmen unter dem Fundament

Die amerikanische IEEE-Norm 80-2000 ([IEEE80] – IEEE-Pendant zur VDE-0101-Reihe) sieht die Möglichkeit vor, zur Verbesserung des Erdungswiderstandes Erdungsleiter mit Bentonit oder anderen natürlichen Tonen zu umgeben. Die Wirksamkeit dieser Maßnahme beruht dabei darauf, dass diese Materialien die Fähigkeit haben, große Mengen Wasser zu speichern, was den spezifischen Bodenwiderstand lokal herabsetzt. Auch wenn die europäische Norm DIN EN 50522 (VDE 0101-2) von der Anwendung solcher Materialien ohne weitere Begründung abrät, sollte dennoch untersucht werden, ob der Einsatz bodenverbessernder Maßnahmen unter der Fundamentplatte deutliche Reduzierungen der entstehenden Schrittspannungen bewirken kann.

Dazu wurde unter einer Bodenplatte mit Fundamenterder (entsprechend Abschnitt 7.1.1) der Boden vollflächig auf einen spezifischen Widerstand von  $\varrho = 100\ \Omega\text{m}$  – also um den Faktor 10 niedriger als der übrige Boden – reduziert. Die Schichtdicke wurde dabei zwischen 25 cm und 2 m in mehreren Schritten variiert. Die entsprechenden Simulationen wurden nur für linearen Boden durchgeführt.

Zur Darstellung der Ergebnisse sind in Abbildung 7.48 die jeweils maximal auftretenden Schrittspannungen bei einem Blitzstrom von  $200\text{ kA}$  in Abhängigkeit von der Schichtdicke  $d$  der Bodenverbesserung und der Gebäudegröße aufgetragen. Zu Vergleichszwecken ist mit  $d = 0\text{ m}$  auch der Wert für einen Fundamenterder ohne jegliche Bodenverbesserung enthalten. Die Diagramme für die beiden übrigen untersuchten

Blitzströme sind in den Abbildungen B.69 und B.70 in Anhang B.3 zu finden.



**Abbildung 7.48.:** Maximal auftretende Schrittspannungen beim Einsatz von Bodenverbesserern mit der Schichtdicke  $d$  unter Fundamentern bei unterschiedlichen Gebäudegrößen und  $I = 200\text{ kA}$

Dabei ist zu erkennen, dass die Schrittspannungen durch den Einsatz von Bodenverbesserern unter der Fundamentplatte besonders bei kleinen Gebäuden zwar grundsätzlich sinken, der Effekt aber nicht übermäßig groß ist (maximal ca. 20–25 %). Insbesondere bewirkt die Maßnahme keine qualitativen Veränderungen, also das Absenken der Schrittspannungen unter den angenommenen Grenzwert. Da aber andererseits der (Kosten-)Aufwand für eine solche Ausführung in der Praxis, gerade bei größeren Schichtdicken, nicht unerheblich ist, muss auch dieses Konzept als nicht praxisrelevant angesehen werden.



## 8. Diskussion der Simulationsergebnisse und Ableitung von Regeln

**Zusammenfassung:** In diesem Kapitel werden die zuvor vorgestellten Simulationsergebnisse in einer Ergebnismatrix zusammengestellt und danach vertiefend diskutiert. Aus den so gewonnenen Erkenntnissen werden einige allgemeine Regeln zur Auslegung von Blitzschutzerdungsanlagen abgeleitet.

### 8.1. Wirksamkeitsmatrix

Die in Kapitel 7 vorgestellten Simulationsergebnisse sollen zunächst in einer Ergebnismatrix zusammengestellt werden. Diese befindet sich in den Tabellen 8.1 (linearer Boden) und 8.2 (nichtlinearer Boden). Darin sind jedoch nur diejenigen Ergebnisse aus den Abschnitten 7.1 und 7.2 enthalten, die – soweit sinnvoll möglich – für alle vier Gebäudegrößen untersucht wurden.

Dabei sind in jedem Ergebnisfeld der Tabellen drei Symbole enthalten, die für das Ergebnis bei unterschiedlichen Blitzstromscheitelwerten stehen. Dies geschieht nach dem Muster „100 kA / 150 kA / 200 kA“ und entspricht somit den Blitzschutz-Gefährdungspegeln „III & IV / II / I“ aus Tabelle 3.1. Die einzelnen Symbole haben dabei folgende Bedeutung:

- Maximal auftretende Schrittspannung  $U_{S,max} \geq 28 \text{ kV}$
- ◐ Maximal auftretende Schrittspannung  $22 \text{ kV} \leq U_{S,max} < 28 \text{ kV}$
- Maximal auftretende Schrittspannung  $U_{S,max} < 22 \text{ kV}$
- Nicht untersucht

Die Schranken für die Vergabe des Symbols des halb ausgefüllten Kreises (◐) wurden durch eine Bandbreite von  $\pm 10\%$  um 25 kV, welche auf  $\pm 3 \text{ kV}$  aufgerundet wurde, bestimmt. Diese Markierung trägt der vorhandenen Unsicherheiten bei der Festlegung des Grenzwertes (vgl. Kapitel 5.5.5) und Abweichungen bei Ausführungen in der Realität (vgl. Kapitel 6.2.6) Rechnung. Gleichzeitig können unter Umständen hier wenig aufwändige Zusatzmaßnahmen zu einer Verbesserung der Erderanlage dahingehend führen, dass der Schrittspannungsgrenzwert eingehalten werden kann.

## 8. Diskussion der Simulationsergebnisse und Ableitung von Regeln

**Tabelle 8.1.:** Wirksamkeitsmatrix unterschiedlicher Erderkonfigurationen für rechteckige Gebäude und linearen Boden

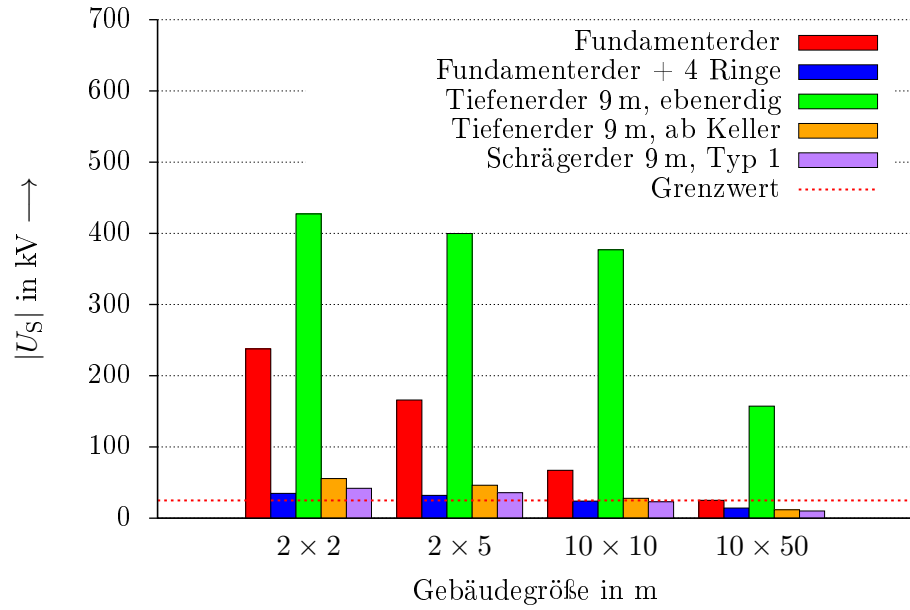
Ausführung	Gebäudegrößen in m			
	2 × 2	2 × 5	10 × 10	10 × 50
Fundamenterder	○/○/○	○/○/○	○/○/○	●/●/●
Fundamenterder + Ringerder				
1 Ring	○/○/○	○/○/○	○/○/○	○/○/○
2 Ringe	○/○/○	○/○/○	○/○/○	●/●/○
3 Ringe	○/○/○	○/○/○	●/○/○	●/●/●
4 Ringe	●/●/○	●/●/○	●/●/○	●/●/●
senkrechte Tiefenerder ab OKG ±0 m				
$l = 6$ m	○/○/○	○/○/○	○/○/○	○/○/○
$l = 9$ m	○/○/○	○/○/○	○/○/○	○/○/○
senkrechte Tiefenerder ab OKG −2 m				
$l = 6$ m	○/○/○	○/○/○	●/●/○	●/●/●
$l = 6$ m, davon 1,5 m isoliert	●/○/○	●/○/○	●/●/○	●/●/●
$l = 6$ m, davon 3 m isoliert	●/○/○	●/○/○	●/●/○	●/●/●
$l = 9$ m	○/○/○	●/○/○	●/●/○	●/●/●
$l = 9$ m, davon 1,5 m isoliert	●/○/○	●/○/○	●/●/○	●/●/●
$l = 9$ m, davon 3 m isoliert	●/○/○	●/○/○	●/●/○	●/●/●
Schrägerder nach außen				
Typ 1, $l = 6$ m	○/○/○	●/○/○	●/○/○	●/●/●
Typ 1, $l = 9$ m	●/○/○	●/○/○	●/●/○	●/●/●
Typ 2, $l = 6$ m	○/○/○	●/○/○	●/○/○	●/●/●
Typ 2, $l = 9$ m	●/○/○	●/○/○	●/●/○	●/●/●
Schrägerder nach innen				
$l = 6$ m, (flach) nicht kreuzend	○/○/○	○/○/○	●/○/○	●/●/●
$l = 6$ m, steil nicht kreuzend	—	○/○/○	—	—
$l = 6$ m, kreuzend	○/○/○	○/○/○	—	—
$l = 9$ m, (flach) nicht kreuzend	○/○/○	○/○/○	●/○/○	●/●/●
$l = 9$ m, steil nicht kreuzend	—	●/○/○	—	—
$l = 9$ m, kreuzend	●/○/○	●/○/○	—	—
sternförmige Schrägerder				
$l = 6$ m, 45°	○/○/○	○/○/○	●/○/○	●/●/●
$l = 6$ m, 90°	○/○/○	○/○/○	●/○/○	●/●/●
$l = 9$ m, 45°	●/○/○	●/○/○	●/●/○	●/●/●
$l = 9$ m, 90°	●/○/○	●/○/○	●/●/○	●/●/●



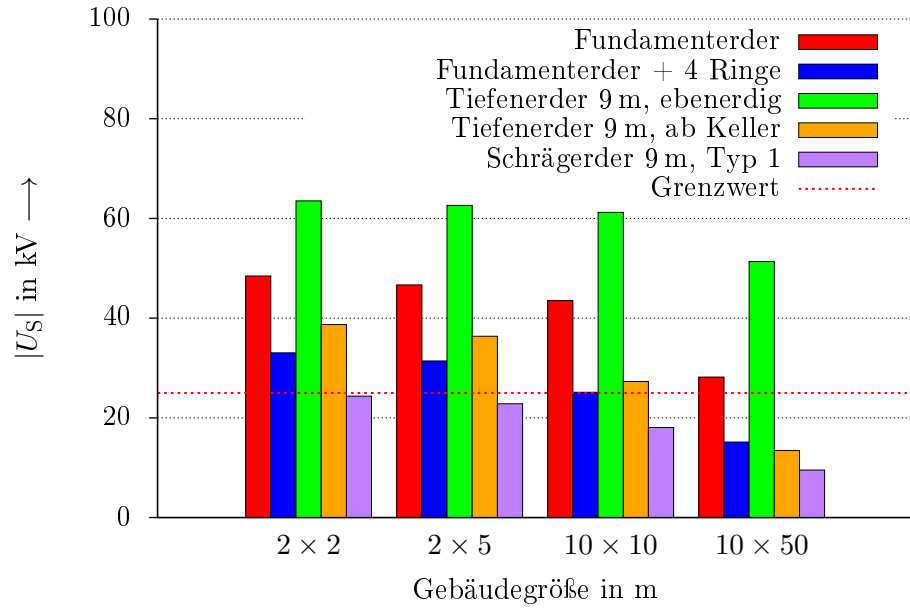
**Tabelle 8.2.:** Wirksamkeitsmatrix unterschiedlicher Erderkonfigurationen für rechteckige Gebäude und nichtlinearen Boden

Ausführung	Gebäudegrößen in m			
	2 × 2	2 × 5	10 × 10	10 × 50
Fundamenterder	○/○/○	○/○/○	○/○/○	●/●/○
Fundamenterder + Ringerder				
1 Ring	○/○/○	○/○/○	○/○/○	○/○/○
2 Ringe	○/○/○	○/○/○	○/○/○	●/○/○
3 Ringe	○/○/○	○/○/○	●/○/○	●/●/○
4 Ringe	●/○/○	●/○/○	●/●/○	●/●/●
senkrechte Tiefenerder ab OKG ±0 m				
$l = 6$ m	○/○/○	○/○/○	○/○/○	○/○/○
$l = 9$ m	○/○/○	○/○/○	○/○/○	○/○/○
senkrechte Tiefenerder ab OKG −2 m				
$l = 6$ m	○/○/○	○/○/○	●/○/○	●/●/●
$l = 6$ m, davon 1,5 m isoliert	●/○/○	●/○/○	●/●/○	●/●/●
$l = 6$ m, davon 3 m isoliert	●/○/○	●/●/○	●/●/●	●/●/●
$l = 9$ m	○/○/○	○/○/○	●/●/○	●/●/●
$l = 9$ m, davon 1,5 m isoliert	●/○/○	●/○/○	●/●/●	●/●/●
$l = 9$ m, davon 3 m isoliert	●/●/○	●/●/○	●/●/●	●/●/●
Schrägerder nach außen				
Typ 1, $l = 6$ m	●/○/○	●/○/○	●/●/○	●/●/●
Typ 1, $l = 9$ m	●/●/○	●/●/○	●/●/●	●/●/●
Typ 2, $l = 6$ m	●/○/○	●/○/○	●/●/○	●/●/●
Typ 2, $l = 9$ m	●/●/○	●/●/●	●/●/●	●/●/●
Schrägerder nach innen				
$l = 6$ m, (flach) nicht kreuzend	○/○/○	○/○/○	○/○/○	●/●/○
$l = 6$ m, steil nicht kreuzend	—	○/○/○	—	—
$l = 6$ m, kreuzend	○/○/○	○/○/○	—	—
$l = 9$ m, (flach) nicht kreuzend	○/○/○	○/○/○	○/○/○	●/●/●
$l = 9$ m, steil nicht kreuzend	—	○/○/○	—	—
$l = 9$ m, kreuzend	●/○/○	○/○/○	—	—
sternförmige Schrägerder				
$l = 6$ m, 45°	○/○/○	○/○/○	●/○/○	●/●/●
$l = 6$ m, 90°	○/○/○	○/○/○	●/○/○	●/●/●
$l = 9$ m, 45°	●/●/○	●/●/○	●/●/●	●/●/●
$l = 9$ m, 90°	●/●/○	●/●/○	●/●/●	●/●/●

## 8. Diskussion der Simulationsergebnisse und Ableitung von Regeln



(a) linearer Boden ( $\rho_{\text{Erde}} = 1000 \Omega\text{m}$ )



(b) nichtlinearer Boden ( $\sigma_{\text{Erde}} = 1 \dots 10 \text{ mS/m}$  gem. Abb. 6.3)

**Abbildung 8.1.:** Maximal auftretende Schrittspannungen bei ausgewählten Erdbungsanlagen und unterschiedlichen Gebäudegrößen für  $I = 200 \text{ kA}$

Den Tabellen 8.1 und 8.2 kann somit auf einfache Art und Weise entnommen werden, welches Erdungskonzept bei welcher Gebäudegröße und welchem Blitzschutz-Gefährdungspegel einen wirksamen Schutz gegen zu hohe Schrittspannungen bietet und welches nicht.

Zusätzlich sind für einige ausgewählte Erderkonfigurationen die jeweils maximal auftretenden Schrittspannungen in Abbildung 8.1 für einen Blitzstrom von 200 kA dargestellt. Diese Konfigurationen sind:

- Fundamenterder, vgl. Kapitel 7.1.1
- Kombination aus Fundamenterder und vier Ringerdern nach VDE, vgl. Kapitel 7.1.2
- Tiefenerder, 9 m lang, ebenerdig beginnend (entspr. Variante h) in Abbildung 7.7), vgl. Kapitel 7.1.3
- Tiefenerder, 9 m lang, ab Kellerniveau beginnend (entspr. Variante d) in Abbildung 7.7), vgl. Kapitel 7.1.3
- Schrägerder, Typ 1, 9 m lang, vgl. Kapitel 7.1.4

Dabei muss in jedem Fall beachtet werden, dass die größten Schrittspannungen bei diesen Erderkonfigurationen jeweils *nicht* am selben Ort auftreten, sondern sich die Orte der höchsten Schrittspannung von Konfiguration zu Konfiguration unterscheiden. Siehe hierzu auch die jeweiligen Diagramme der Schrittspannung in Abhängigkeit des Radius in den oben genannten Kapiteln.

## 8.2. Diskussion der Ergebnisse

Die einfachste Form eines Blitzschutzerders ist die des Fundamenterders. Dessen Errichtung wird in IEC 60364-5-54 (DIN VDE 0100-540) ohnehin im Rahmen des Schutzes gegen direktes und indirektes Berühren für Neubauten nachdrücklich empfohlen, kann also in der Regel als vorhanden angenommen werden. Wie die Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch gezeigt haben, bietet der Fundamenterder alleine bei kleineren Gebäuden noch keinen Schutz gegen zu hohe Schrittspannungen um das zu schützende Gebäude. Erst bei größeren Gebäuden (hier  $10\text{ m} \times 50\text{ m}$ ) wird der Grenzwert knapp eingehalten.<sup>1</sup>

Der eventuell naheliegende Ansatz, einen für sich genommen unzureichenden Fundamenterder mit einem zusätzlichen Ringerder zu verbessern, ist jedoch, wie die Ergebnisse in Kapitel 7.1.2 zeigen, vollkommen kontraproduktiv, da es hierbei zu stark erhöhten Schrittspannungen gegenüber dem einzelnen Fundamenterder kommt. Der

---

<sup>1</sup>Dass der Grenzwert bei der Darstellung im Fall des nichtlinearen Bodens überschritten wird, ist darauf zurückzuführen, dass der Umrechnungsfaktor von prospektiver Schrittspannung zu tatsächlicher Schrittspannung sehr konservativ gewählt wurde (vgl. Kapitel 6.1.4). Es ist davon auszugehen, dass die realen Schrittspannungen denen des Falls linearen Bodens entsprechen.

## 8. Diskussion der Simulationsergebnisse und Ableitung von Regeln

Grund für dieses Ergebnis liegt darin, dass der Fundamenterder – falls die Ableitungen des Blitzschutzsystems isoliert ausgeführt sind, wie in den Simulationen implizit angenommen – den Blitzstrom in einer Tiefe von ca. 2 m in den Boden leitet, während ein zusätzlicher Ringerder bei einer VDE-gemäßen Ausführung lediglich 50 cm unter der Erdoberfläche liegt. Dadurch wird das sehr hohe Potential der Erdungsleitungen sehr viel dichter unter die Erdoberfläche gebracht und führt dort entsprechend zu höheren Schrittspannungen. Durch Hinzufügen eines zweiten Ringerders zeigten sich zwar bereits ein feldsteuernder Effekt und damit sinkende Schrittspannungen gegenüber einem einzelnen Ringerder, jedoch reicht dies bei größeren Gebäuden noch nicht, das Schrittspannungsmaximum unter dasjenige eines einzelnen Fundamenterders zu senken. Erst mit weiteren Ringen wird die Feldsteuerung so gut, dass die Schrittspannungsmaxima in jedem Fall unter denen eines Fundamenterders liegen.

Dabei zeigen die Variationen des Ringerder-Konzeptes abseits der Norm (also die Veränderung von Verlegetiefe und -abstand sowie das Weglassen von Ringen in der Mitte der Erdungsanlage), dass die Wirksamkeit einer solchen Anlage ganz offensichtlich hauptsächlich von der Position des äußersten Ringerders bestimmt wird: Der kritischste Punkt im Hinblick auf Schrittspannungen liegt, wie Kapitel 7.1.2 eindeutig gezeigt hat, knapp außerhalb der Erderanlage und wird in Bezug auf das Schrittspannungsmaximum durch den äußersten Ringerder bestimmt. Dies bedeutet in logischer Konsequenz, dass in allen Fällen, in denen eine normgemäß errichtete Vier-Ringerder-Anlage einen ausreichenden Schrittspannungsschutz bietet, die mittleren Ringe in ihrer Position im Raum sehr frei verschoben oder sogar teilweise weggelassen werden können. Denn diese Abweichungen von der Normvorgabe verändern lediglich die Schrittspannungen innerhalb der Anlage, die aber bei einer „normalen“ Ringerder-Anlage deutlich unterhalb des Schrittspannungsmaximums am Rand der Anlage liegen und somit ausreichend Sicherheitsspielraum für lokale Erhöhungen bieten. Lediglich bei extremen Abweichungen von der Norm wie beispielsweise dem Weglassen sowohl des zweiten als auch des dritten Ringes steigen die Schrittspannungen innerhalb der Anlage über das (lokale) Maximum am Rand. (Vgl. hierzu insb. Abbildungen 7.27 und 7.28.) Das bedeutet, dass sich alle Kombinationen aus Gebäudegröße und Gefährdungspegel, die mit einer normgemäßen Vier-Ringerder-Anlage ausreichend geschützt sind (vgl. Tabellen 8.1 und 8.2), sich auch durch lediglich drei Ringe ausreichend schützen lassen, wenn diese gemäß Kapitel 7.2.1 verlegt sind.

Bei der Betrachtung von senkrechten Tiefenerdern zeigt sich ein Bild, das sowohl in sich als auch zusammen mit den Ergebnissen der Ringerder bereits auf den ersten Blick schlüssig ist: längere Tiefenerder liefern stets niedrigere Schrittspannungen als kürzere, und Tiefenerder, die erst auf Kellerniveau beginnen, liefern deutlich niedrigere Schrittspannungen als gleich lange Tiefenerder, die bereits an der Erdoberfläche beginnen. Dieses Verhalten setzt sich bei den teilweise isolierten Tiefenerdern fort, die nochmals niedrigere Schrittspannungen als gleichlange, ebenfalls auf Kellerniveau beginnende Tiefenerder bewirken. In diesem Zusammenhang muss jedoch nochmals betont werden, dass eine teilweise Isolierung von Tiefenerdern zwar niedrigere Schrittspannungen als gleichlange unisolierte Tiefenerder bewirken, durch die kürzere erd-

fühligkeitslänge jedoch der Erdungswiderstand und damit auch die Potentialanhebung der Erdungsanlage im Falle eines Blitzschlages steigt, was insbesondere beim inneren Blitzschutz zu größeren Problemen führt. Dies kann jedoch durch den Einsatz von insgesamt längeren Tiefenerdern kompensiert werden, was zusätzlich ebenfalls für niedrigere Schrittspannungen sorgt.

Sollte ein Eintreiben von Tiefenerdern ab Kellerniveau nicht möglich sein, beispielsweise weil ein bereits bestehendes Gebäude nachgerüstet werden soll, lässt sich der gleiche Effekt erzielen, indem die gewählten Erder um mindestens 2 m länger gewählt und dabei mindestens die obersten 2 m isoliert ausgeführt werden. Ein solchermaßen abgewandelter Staberder kann auch außerhalb des Gebäudes direkt ab Erdoberfläche eingetrieben werden und liefert dabei die gleichen Schrittspannungen wie ab Kellerniveau eingetriebene Tiefenerder.

Ebenfalls beim Betrachten der Tiefenerder wird sehr anschaulich, dass der statische Erdungswiderstand für sich genommen *nicht* dazu geeignet ist, die Wirksamkeit einer Erdungsanlage im Hinblick auf Schrittspannungen zu beurteilen: Eine Erdungsanlage mit ab Erdoberfläche wirksamen Tiefenerdern hat näherungsweise denselben statischen Erdungswiderstand wie eine Erdungsanlage mit der gleichen Anzahl und gleichlangen Tiefenerdern, die erst ab Kellerniveau wirksam sind, letztere führt aber zu deutlich niedrigeren Schrittspannungen, wie Kapitel 7.1.3 gezeigt hat.

Werden die Tiefenerder nicht senkrecht, sondern so geneigt eingetrieben, dass sie dabei vom Gebäude weg zeigen (vgl. Kapitel 7.1.4), fallen die resultierenden Schrittspannungen nochmals niedriger aus als bei gleichlangen senkrechten Tiefenerdern. Offensichtlich setzt bereits hier der weiter oben angesprochene feldsteuernde Effekt von räumlich ausgedehnten Erdungsanlagen ein. Dazu passt auch, dass gleich lange, jedoch zur Gebäudemitte hin geneigte Schrägerder (vgl. Kapitel 7.2.2) im direkten Vergleich höhere Schrittspannungen liefern: hier findet offensichtlich keine ausreichende Feldsteuerung statt. Die Schrittspannungen liegen in diesem Fall sogar über denjenigen vergleichbarer senkrechter Tiefenerder. In dieses Bild passen auch die Schrittspannungen der Sternerder nach Kapitel 7.2.3, die etwas über denjenigen der weiter oben genannten, nach außen geneigten Schrägerder nach Kapitel 7.1.4 liegen: Der virtuelle Radius, der sich um die unteren Enden der Erderstäbe legen lässt, ist bei den Sternerdern deutlich kleiner als bei den Schrägerden, was die schlechtere Feldsteuerung und dadurch die höheren Schrittspannungen der Sternerder erklärt.

Im Gegensatz dazu ist das Verhalten beim Einsatz von zusätzlichen Erderbögen an den Gebäudeecken (vgl. Kapitel 7.2.5) oder dem Einbau eines tiefliegenden Ringerders (vgl. Kapitel 7.2.6) nicht unmittelbar ersichtlich: Obwohl beide Konzepte Erderleiter vergleichsweise tief im Boden (ca. 2 m) beinhalten und größere Flächen aufspannen als ein Fundamenterder alleine, führen doch beide Konzepte zu höheren Schrittspannungen als der einzelne Fundamenterder. Hier ist der Grund darin zu suchen, dass beide Maßnahmen blitzstromführende Leiter – und damit hohe Potentiale – unter den Bereich bringen, der auf der Erdoberfläche betreten werden kann, gleichzeitig aber die räumliche Ausdehnung nicht groß genug ist, um eine feldsteuernde Wirkung zu erreichen, die so gut wäre, dass sie den zuvor genannten Hochpotential-eintrag mindestens kompensieren würde. Diese Ansätze verhalten sich somit ähnlich

## 8. Diskussion der Simulationsergebnisse und Ableitung von Regeln

wie der einzelne Ringerder nach Norm, nämlich, dass eine Maßnahme, welche auf den ersten Blick als Verbesserung erscheint, tatsächlich kontraproduktiv ist.

Generell zeigen jedoch alle Erderkonfigurationen in einer Hinsicht dieselbe Tendenz, nämlich, dass eine gegebene Erderkonfiguration bei einem größeren Gebäude zu niedrigeren Schrittspannungen als an einem kleinen Gebäude führt. Hierbei können je nach Erderkonfiguration ein oder zwei Effekte verantwortlich sein: In jedem Fall spannt bei einem größeren Gebäude die Erdungsanlage auch eine größere Fläche auf, sodass es zu einer besseren Feldsteuerung kommt. Bei einigen Erderkonfigurationen (Fundamenterder, Ringerder, Tiefenerder bei sehr großen Gebäuden) nimmt mit der Gebäudegröße auch die Gesamtlänge der erdfühiligen Leiter zu, sodass sich zudem auch ein kleinerer Erdungswiderstand ergibt (der aber, wie weiter oben geschrieben, für sich genommen noch keine Aussagekraft bezüglich Schrittspannungen hat). In diesem Zusammenhang muss auch festgestellt werden, dass sich sehr kleine Gebäude auch mit hohem Aufwand durch Erdungsmaßnahmen alleine, wie beispielsweise einer Vier-Ringerder-Anlage, praktisch nicht ausreichend gegen zu hohe Schrittspannungen schützen lassen, insbesondere nicht für die Blitzschutz-Gefährdungspegel I und II. Hier bliebe nur die Anwendung zusätzlicher, in der Norm vorgesehener Maßnahmen wie zum Beispiel das Aufbringen eines isolierenden Bodenbelages oder eine Sperrung des gefährlichen Bereichs für Personen.

Bezüglich der Berücksichtigung und Nichtberücksichtigung von Bodenionisierung ist zu sagen, dass die Berücksichtigung dieses Effekts grundsätzlich zu niedrigeren Schrittspannungen insbesondere in Gebäudenähe führt. Bei kleineren Gebäuden ist dieser Effekt dabei stärker ausgeprägt als bei größeren, da sich hier geometriebedingt um die Erdungsanlage eine größere Stromdichte beziehungsweise eine hohe Stromdichte in einem größeren Gebiet um die Erder ergibt. Dies führt nach (3.1) zu einer höheren Feldstärke im Boden, welche eine ausgeprägtere Bodenionisierung nach sich zieht. Für die praktische Umsetzung ist jedoch zu beachten, dass die örtlich gegebenenfalls tatsächlich einsetzende Bodenionisierung stark vom lokal vorhandenen Boden abhängt, da beispielsweise die Werte für die kritische Feldstärke  $E_c$ , ab welcher der Boden ionisiert wird, stark streuen kann (vgl. [AGS11]). Daher ist – obwohl in dieser Arbeit meist auch Ergebnisse für einen nichtlinearen Boden, nicht zuletzt in Tabelle 8.2, gezeigt werden – dazu zu raten, den Effekt der Bodenionisierung bei der Auslegung einer Erdungsanlage *nicht* zu berücksichtigen. Sollte bei einem Blitzschlag Bodenionisierung dennoch auftreten, kann dies die Schrittspannungen nur positiv beeinflussen und somit eine zusätzliche Sicherheitsmarge bieten. Sollte Bodenionisierung dagegen nicht auftreten, wäre die Erdungsanlage dennoch ausreichend dimensioniert.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass aus Sicht einer Schrittspannungssteuerung von den hier vorgestellten Erderkonzepten das der Ringerder das beste ist. Während Tiefen- oder auch Schrägerder durchaus eine vergleichbare Schutzwirkungen bieten, entfällt bei Ringerdern aber die Notwendigkeit, Ableitungen bis in den Erdboden hinein isoliert auszuführen.<sup>2</sup> (Dass dies bei Tiefen- und Schrägerdern ab Kellerniveau

---

<sup>2</sup>Diese Aussage gilt nur bezogen auf Schrittspannungssteuerungen. Zur Beherrschung von Berühr-

absolut notwendig ist, ergibt sich implizit aus den Ergebnissen in Kapitel 6.2.2.) Da bei Ringerder-Anlagen die höchsten Schrittspannungen jedoch am Rand und knapp außerhalb der Anlage auftreten, kann dies im konkreten Einzelfall dazu führen, dass Orte, an denen der vorgeschlagene Grenzwert überschritten wird, möglicherweise nicht mehr in der Verfügungsgewalt des Bauherren liegen, sondern beispielsweise auf einem Nachbargrundstück oder sogar auf öffentlichen Bereichen. In diesem Fall gilt es, diverse rechtliche Fragestellungen zu beachten und im Vorfeld zu klären.

Abschließend sei auch nochmals darauf hingewiesen, dass sich alle hier vorgestellten und diskutierten Ergebnisse, speziell die Tabellen 8.1 und 8.2, auf einen spezifischen Bodenwiderstand  $\rho = 1000 \Omega\text{m}$  beziehen. Sollte eine Baugrunduntersuchung vor Ort einen Bodenwiderstand ermitteln, der deutlich darunter liegt, können unter Umständen weitere Varianten von Erdungsanlagen einen wirksamen Schutz vor zu hohen Schrittspannungen bieten. Umgekehrt könnten bei höheren Bodenwiderständen hier als geeignet bewertete Erdungsvarianten keinen ausreichenden Schutz mehr bieten. Da jedoch, wie auch die vorliegende Arbeit gezeigt hat, heute leistungsfähige Simulationssoftware existiert, kann in solchen Fällen – oder sonstigen Abweichungen von den hier diskutierten Erderkonfigurationen – relativ einfach überprüft werden, ob die gewählte Erderkonfiguration einen ausreichenden Schutz vor zu hohen Schrittspannungen bietet.

Eine solche Untersuchung einer konkreten Erdungsanlage mittels Simulationssoftware wird dabei zusätzlich dadurch vereinfacht, dass hierzu auch rein stationäre Simulationen mit Gleichstrom durchgeführt werden können. Dies reduziert den Rechenzeitbedarf gegenüber transienten Simulationen drastisch und erlaubt so eine Analyse in deutlich kürzerer Zeit beziehungsweise die Analyse von deutlich mehr Erdungskonfigurationen in gegebener Zeit. Auch dies ist ein wesentliches Ergebnis der vorliegenden Arbeit (siehe Kapitel 6.2.1).

### 8.3. Allgemeine Regeln zur Auslegung von Blitzschutz-Erdungsanlagen

Ausgehend von den bisher vorgestellten Ergebnissen sollen hier nun einige allgemeine Regeln in Stichpunktform aufgestellt werden, die bei der Auswahl eines Erdungskonzeptes oder der Auslegung einer Blitzschutz-Erdungsanlage helfen können. Die Reihenfolge ist dabei nicht als Wertung zu verstehen. Auch wenn einige Regeln möglicherweise trivial erscheinen, sollen sie der Vollständigkeit halber hier dennoch mit aufgeführt werden.

1. Je größer ein zu schützendes Gebäude ist, desto leichter ist eine ausreichende Schrittspannungssteuerung zu erreichen.
2. Je niedriger der örtliche spezifische Bodenwiderstand ist, desto niedriger werden bei einer gegebenen Erdungsanlage die Schrittspannungen ausfallen.

---

spannungen – die in dieser Arbeit überhaupt nicht betrachtet werden – kann eine isolierte Ausführung von Ableitungen dennoch notwendig sein.

## 8. Diskussion der Simulationsergebnisse und Ableitung von Regeln

3. Je tiefer die Erdungsanlage in die Erde reicht, desto geringer fallen im Allgemeinen die resultierenden Schrittspannungen aus. Dies gilt sowohl für die Tiefe der Erdungsleiter insgesamt, also auch für die Tiefe der höchsten erdfühiligen Teile der Erdungsanlage.
4. Das Hinzufügen weiterer Erderleiter kann eine bestehende Erderanlage unter ungünstigen Umständen deutlich verschlechtern (siehe Fundamenterder und Hinzufügen eines einzelnen Ringerders).
5. Sollen oder müssen aktive Erderteile unter dem begehbaren Bereich um ein Gebäude liegen, ist darauf zu achten, dass diese räumlich soweit ausgedehnt sind, dass sich ein deutlicher feldsteuernder Effekt ergibt. Andernfalls kann es sinnvoller sein, sämtliche aktive Erderteile unter dem zu schützenden Gebäude zu platzieren.
6. Sofern sich aktive Erderteile unmittelbar an den Ecken eines rechteckigen Gebäudes befinden, treten die höchsten Schrittspannungen immer entlang von Linien auf, die im  $45^\circ$ -Winkel von den Gebäudeecken ausgehen.
7. Die höchsten Schrittspannungen befinden sich abhängig von der Erderkonfiguration nicht zwangsläufig unmittelbar am Gebäude, sondern können auch erst in einigen Metern Entfernung auftreten.
8. Erdboden, in dem Bodenionisierung stattfindet, führt immer zu niedrigeren Schrittspannungen als Erdboden ohne diesen Effekt.
9. Soll der Effekt der Bodenionisierung berücksichtigt werden, um sich die niedrigeren Schrittspannungen zu Nutze zu machen, ist grundsätzlich eine genaue Untersuchung des tatsächlich vor Ort vorhandenen Bodens anzuraten, um die Ionisierungsparameter wie die kritische Feldstärke  $E_c$  zu bestimmen.

Es muss abschließend nochmals ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass es sich bei den oben genannten Regeln lediglich um grobe Hinweise handelt. Treten bei der konkreten Auslegung eines praktischen Projektes Bedingungen auf, die nicht den hier angenommenen Rahmenbedingungen entsprechen (andere Gebäudeformen, stark abweichende Gebäudegrößen oder Bodenleitfähigkeiten usw.), ist stets eine genaue Einzelfalluntersuchung, beispielsweise wie hier vorgestellt mittels Computersimulationen, anzuraten.



## 9. Behandlung von aktuellen Sonderfällen an Hand ausgewählter Praxis-Beispiele

**Zusammenfassung:** *In der Praxis ergibt sich eine größere Vielfalt an zu schützenden Gebäuden und Strukturen als hier bislang behandelt wurde. Daher soll an Hand zweier ausgewählter und derzeit sehr aktueller Beispiele gezeigt werden, wie mögliche Lösungen für Sonderfälle aussehen können.*

### 9.1. Windkraftanlagen

Nicht zuletzt bedingt durch die sogenannte Energiewende ist der Zubau an Windkraftanlagen (WKA) in Deutschland unvermindert stark. Alleine im Jahr 2012 wurden knapp 1000 neue Anlagen errichtet (Quelle: [BWE13]). Aufgrund ihrer Höhe und ihrer üblicherweise exponierten Position in der Umgebung sind Windkraftanlagen dabei prädestiniert für Blitzeinschläge. Daher soll hier vorgestellt werden, wie die unmittelbare Umgebung einer WKA im Fall eines Blitzeinschlages vor gefährlich hohen Schrittspannungen geschützt werden kann.

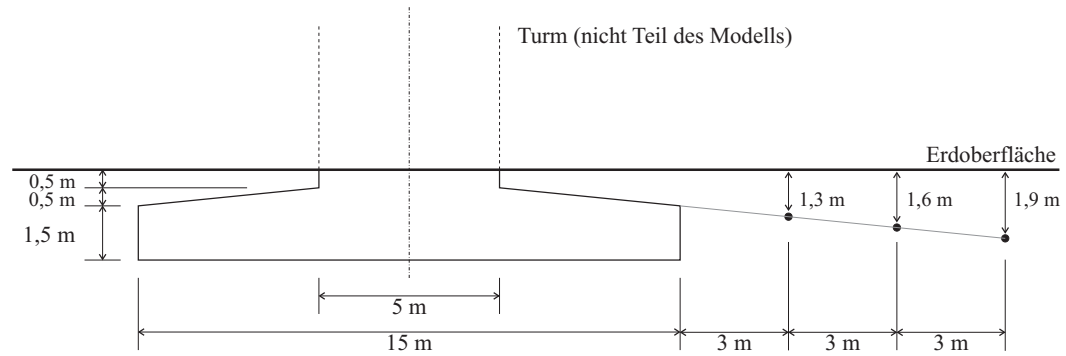
Als Ausgangspunkt für diese Untersuchung dient dabei ein fiktives<sup>1</sup> scheibenförmiges Betonfundament gemäß Abbildung 9.1. Das Fundament ist dabei mit einem Stahlkern zur Nachbildung der Bewehrung entsprechend Kapitel 6.2.2 versehen, wobei die Betonüberdeckung auch hier 5 cm beträgt. Alle übrigen Simulationsparameter wie die Leitfähigkeit von Beton und Erde, Größe des Berechnungsgebietes usw. entsprechen dabei den Annahmen und Festlegungen aus Kapitel 6.1.

Dieses Fundament wurde mit bis zu drei Ringerdern ergänzt, die ebenfalls in Abbildung 9.1 dargestellt sind. Dabei wurden die einzelnen Ringe abweichend von der Vorgabe aus DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3) positioniert: Die Verlegetiefen sind geringer, sodass die Ringe die kegelförmige Kontur der Fundamentoberseite nach außen hin gleichförmig fortsetzen. Zudem besteht die Erdungsanlage aus maximal drei statt vier Ringen, dafür ist der innerste Ring 3 m statt 1 m von der Außenkante des Fundamentes entfernt. In Anlehnung an die Erkenntnisse aus Kapitel 7.2.1, dass die Positionierung des äußersten Ringerders maßgeblich die maximale Schrittspannung bestimmt, wurde zudem eine Anlage mit nur zwei Ringen simuliert, bei der sich der

---

<sup>1</sup>Die Dimensionierung des WKA-Fundamentes entspricht keiner konkreten Anlage, orientiert sich aber grob an verschiedenen realen Anlagen.

## 9. Sonderfälle



**Abbildung 9.1.:** Maßskizze des angenommenen Fundamentes einer Windkraftanlage sowie die darum positionierten Ringerder

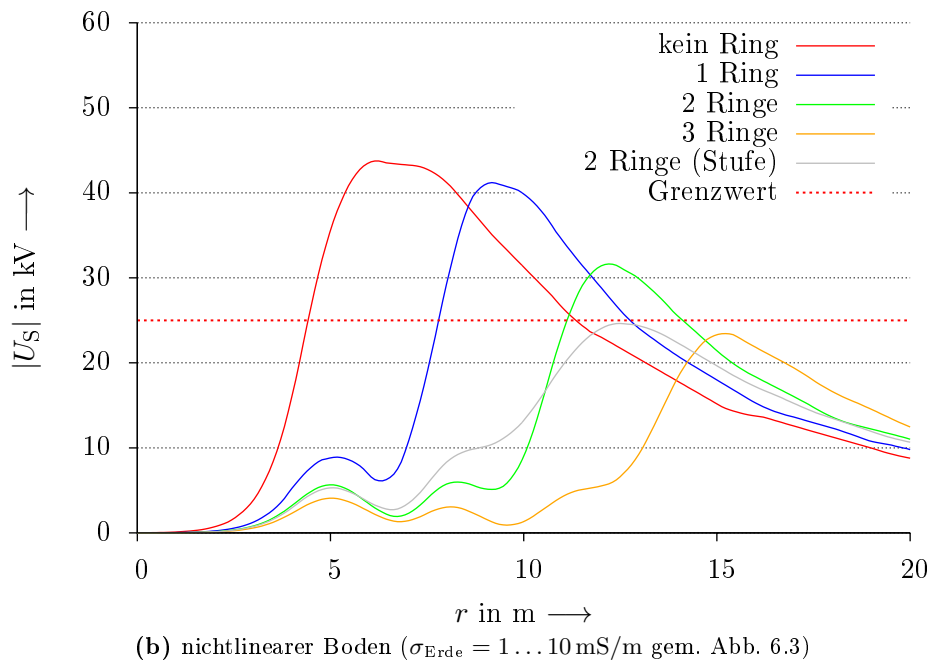
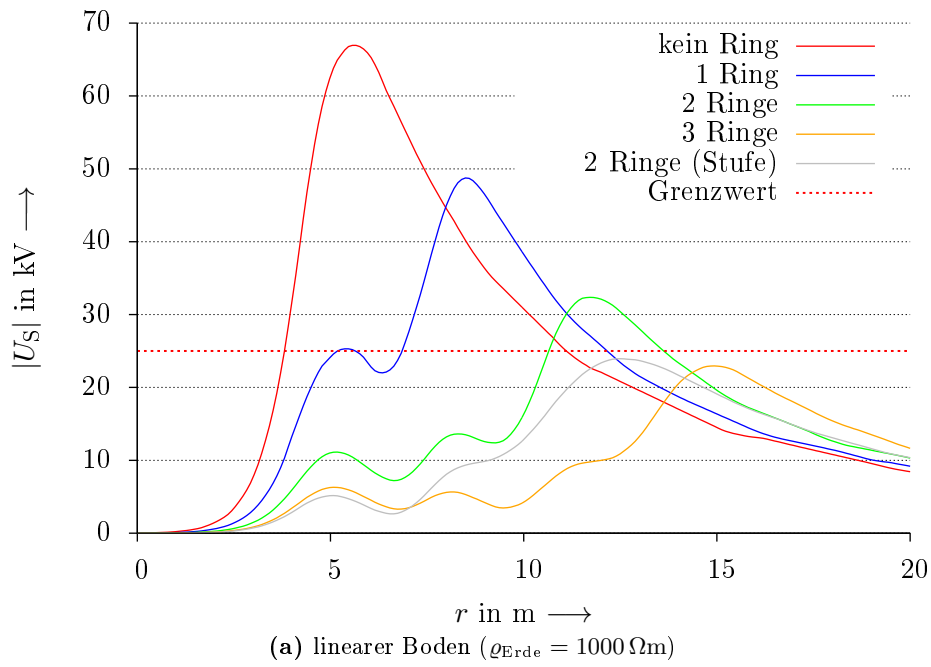
äußere Ring jedoch in 2,5 m Tiefe befindet (in Abbildung 9.2 als „2 Ringe (Stufe)“ bezeichnet).

Die Ergebnisse für einen Blitzstrom von 200 kA sind in Abbildung 9.2 zu sehen. Die Entfernung  $r$  ist dabei von der Wand des WKA-Turmes aus gerechnet. Beim Betrachten der Ergebnisse fällt auf, dass sich unabhängig von der Anzahl der verwendeten Ringerder ein Bereich von ca. 3–4 m Breite um den Turm der WKA ergibt, in dem die Schrittspannung unter dem angenommenen Grenzwert liegt. Offensichtlich führt hier bereits die Formgebung des WKA-Fundamentes an sich, das sich unterirdisch bis weit unter den begehbaren Bereich um den Turm erstreckt, zu einer guten Potentialsteuerung. Am Rand des Fundamentes treten jedoch wieder sehr hohe Schrittspannungen auf, ein Effekt der prinzipiell bereits von den Ringerdern in Kapitel 7.1.2 her bekannt ist. Das Hinzufügen von Ringerdern dämpft erwartungsgemäß dieses lokale Maximum und verschiebt es weiter vom Turm weg, jedoch wird erst mit drei Ringerdern der angenommene Schrittspannungsgrenzwert an jeder Stelle um die Windkraftanlage unterschritten.

Ein gleichwertiges Ergebnis wie mit drei Ringen kann jedoch auch mit lediglich zwei Ringen erzielt werden, wenn der äußere Ring deutlich tiefer (hier mindestens 2,5 m) verlegt wird. Somit ist eine deutliche Verbesserung in Bezug auf den Errichtungsaufwand im Vergleich zur Norm möglich.

Würde statt der hier vorgestellten „flachen“ Ringerder-Anordnung mit lediglich drei Ringen eine normgemäße Vier-Ringerder-Anlage verwendet (die jedoch ebenfalls erst am äußeren Rand des Fundamentes beginnt), würden die Schrittspannungen insgesamt noch niedriger ausfallen, da hierbei die Ringe in größerer Tiefe und teilweise weiter vom WKA-Turm entfernt wären. (Vgl. hierzu Kapitel 7.1.2.)

Darüber hinaus muss noch darauf hingewiesen werden, dass sich zwar bereits durch das Fundament unmittelbar am Turm der Windkraftanlage ein Bereich befindet, der vor hohen Schrittspannungen geschützt ist, es in diesem Bereich aber bei sehr starken Blitzeinschlägen eventuell zu herabfallenden Trümmern vom Rotor oder Gondel der WKA kommen könnte, vor denen natürlich kein Schutz besteht. Auch wurde hier



**Abbildung 9.2.:** Schrittspannungen um das Fundament einer Windkraftanlage für  $I = 200 \text{ kA}$  bei Verwendung mehrerer Ringerder.

nicht untersucht, ob sich an dem oft in Stahlbauweise errichteten Turm nicht eventuell gefährliche Berührspannungen ergeben.

### 9.2. Schutzhütten

Am 29.06.2012 wurden vier Golferinnen, die auf einem Golfplatz in Waldeck bei Korbach in einem Unterstand Schutz vor einem Unwetter gesucht hatten, tödlich verletzt, als ein Blitz in die Schutzhütte oder einen daneben stehenden Baum einschlug ([Rot12a], [Rot12b]). Dieser Unfall löste in der deutschen Blitzschutz-Fachwelt, nicht zuletzt im Ausschuss für Blitzschutz und Blitzforschung im VDE (VDE/ABB), eine intensive Diskussion darüber aus, ob und wie kleine Schutzhütten und Unterstände besser vor Blitzschlägen geschützt werden können, um solche Unfälle zukünftig zu vermeiden.

Als Ausgangsmodell wurde eine Schutzhütte mit quadratischem Grundriss und einer Kantenlänge von 3 m angenommen, die nicht unterkellert ist und auch kein festes Fundament besitzt. Alle anderen Simulationsparameter sind identisch zu den bisherigen Simulationen. Wie bereits im Hinblick auf die Tabellen 8.1 und 8.2 zu erkennen ist, ist der umfassende Schutz eines solch kleinen Gebäudes vor gefährlichen Schrittspannungen nicht einfach zu erreichen. Es wurden dazu folgende Erderkonfigurationen untersucht, wobei die Erder stets in einer Tiefe von 50 cm verlegt wurden:

- Ein einzelner Ringerder in 1 m Abstand zum Gebäude (also einer Kantenlänge von 5 m, Bezeichnung „Ring“, Abbildung 9.3a)
- Wie vor, jedoch mit zwei zusätzlichen, sich kreuzenden waagrechten Erderstäben jeweils in der Mitte („Kreuz“, Abbildung 9.3b)
- Ein Ringerder mit zusätzlichen waagrechten Erderstäben im 1-m-Raster („Gitter“, Abbildung 9.3c)
- Wie vor, jedoch Gitter im 50-cm-Raster („feines Gitter“, Abbildung 9.3d)
- Wie vor, jedoch zusätzlich zwei mit jeweils 6 m langen Tiefenerdern an zwei gegenüberliegenden Ecken des Gitters („feines Gitter + TE“)

Die einzelnen Varianten sind in Abbildung 9.3 skizziert. Auf die Untersuchung einer Vier-Ringerder-Anlage nach DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3) wurde verzichtet, da diese erstens gemäß Tabelle 8.1 und 8.2 nur für  $I = 100 \text{ kA}$  einen ausreichenden Schutz bieten würde und zweitens der Verlegeaufwand für eine einfache Schutzhütte überproportional hoch erscheint.

Die Ergebnisse sind für einen Blitzstrom von 200 kA in Abbildung 9.4 und für alle übrigen Blitzströme in den Abbildungen B.71 bis B.75 in Anhang B.4 zu sehen. Dabei ist zu beachten, dass der Ort  $r = 0 \text{ m}$  abweichend von den bisherigen Schrittspannungsgraphen nicht an der Wand, sondern in der Mitte der Schutzhütte liegt, die Graphen also auch das Hütteninnere abdecken. Die schwarze, senkrechte,

gestrichelte Linie in der Abbildung 9.4 markiert dabei die Grenze zwischen Innen- und Außenbereich.

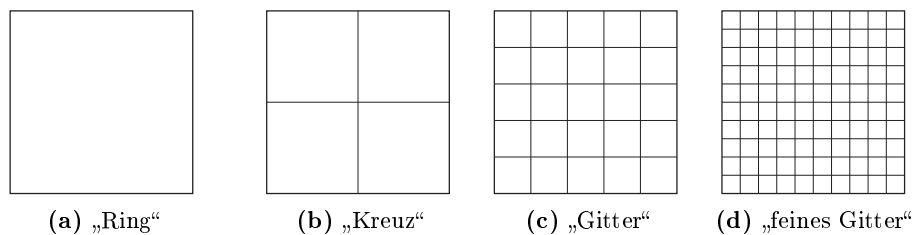
Eine vergleichende Darstellung wie in Abbildung 9.4, jedoch für  $I = 100 \text{ kA}$ , ist in Abbildung B.76 auf Seite 252 in Anhang B.4 zu finden.

Beim Betrachten der Ergebnisse wird sofort deutlich, dass einfache Erdervarianten wie „Ring“ oder „Kreuz“ weder im Inneren der Hütte noch in deren Außenbereich bei linearem Boden eine ausreichende Schrittspannungssteuerung gewährleisten. Erst bei Berücksichtigung von Bodenionisation oder mit der Verwendung aufwändigerer Erdervarianten wie „Gitter“ ergibt sich zumindest im Inneren ein geschützter Bereich, jedoch steigt auch hier bereits im Randbereich und insbesondere außerhalb des Gitters die Schrittspannung deutlich an und überschreitet den angenommenen Grenzwert schließlich bei weitem. Da die Grenzwertüberschreitungen derart groß ausfallen, ist davon auszugehen, dass auch weitere kleinere Abwandlungen der untersuchten Erderkonfigurationen keine entscheidenden Verbesserungen mehr liefern.

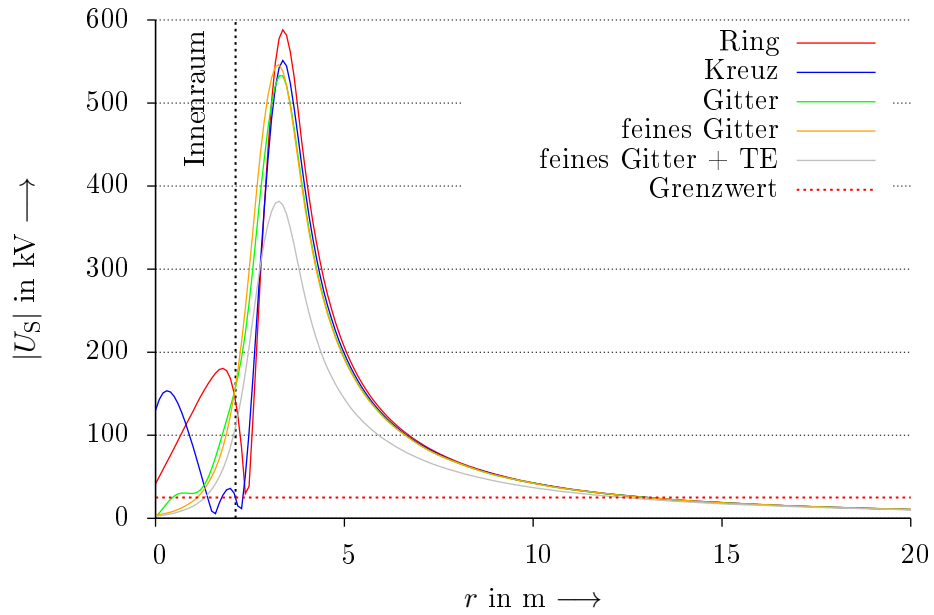
Auch für einen Blitzstrom von lediglich  $100 \text{ kA}$  ergibt sich ein ähnliches Bild: Nur bei Berücksichtigung der Bodenionisation ergibt sich im Inneren der Schutzhütte ein sicherer Bereich. Dieser ist jedoch, im Gegensatz zu  $I = 200 \text{ kA}$ , mit allen untersuchten Erdungsvarianten zu erzielen und erstreckt sich dabei stets über den kompletten Innenraum der Hütte.

Somit bleibt zusammenfassend festzustellen, dass sich mit vertretbarem Aufwand zwar das Innere einer Schutzhütte vor zu hohen Schrittspannungen schützen lässt, nicht jedoch der Außenbereich. Für den Außenbereich bleibt daher nur das Ausweichen auf alternative Maßnahmen wie das Anlegen eines isolierenden Bodenbelages oder organisatorische Maßnahmen wie das Anbringen geeigneter Warnschilder, sich bei Gewitter nicht außen an der Schutzhütte aufzuhalten.

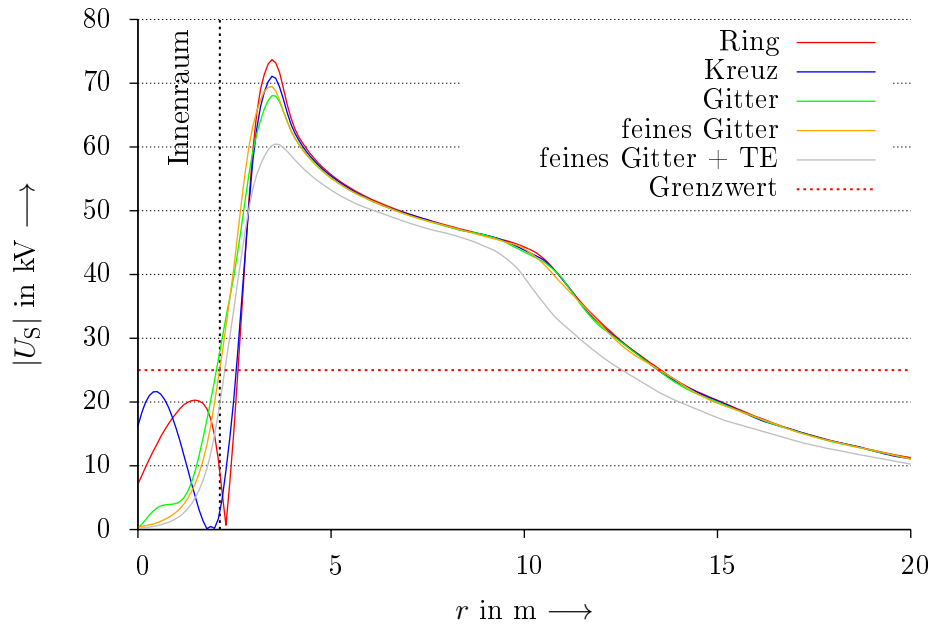
Auch im Fall der Schutzhütte muss jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass sich die vorliegenden Untersuchungen nicht mit möglichen Berührspannungen beschäftigen. Diese müssen bei der Errichtung einer entsprechenden Blitzschutzanlage unbedingt separat berücksichtigt werden.



**Abbildung 9.3.:** Prinzipskizzen in Draufsicht der unterschiedlichen Ausführungsvarianten von Erden für Schutzhütten



(a) linearer Boden ( $\rho_{\text{Erde}} = 1000 \Omega\text{m}$ )



(b) nichtlinearer Boden ( $\sigma_{\text{Erde}} = 1 \dots 10 \text{ mS/m}$  gem. Abb. 6.3)

**Abbildung 9.4.:** Schrittspannungen in und um eine(r) Schutzhütte für  $I = 200 \text{ kA}$  bei Verwendung verschiedener Erderkonfigurationen.

## 10. Zusammenfassung und Ausblick

Zum Schutz von Gebäuden vor Blitzeinschlägen ist ein Blitzschutzsystem unvermeidbar. Ein modernes äußeres Blitzschutzsystem für Gebäude besteht neben den Fangeinrichtungen und den Ableitungen auch aus einem Erdungssystem, welches dazu dient, die Blitzströme in den Boden einzuleiten und dort möglichst gefahrlos zu verteilen. Bedingt durch die Kombination aus den sehr großen Strömen eines Blitzes einerseits und der im Regelfall schlechten elektrischen Leitfähigkeit des Erdbodens andererseits kommt es im Fall eines Blitzschlages grundsätzlich zu starken Anhebungen des elektrischen Potentials in der Erdungsanlage und dem umgebenden Boden. Werden keine geeigneten Maßnahmen zur Potentialsteuerung ergriffen, bewirkt dieser Potentialanstieg auch starke Potentialgefälle im Erdboden, die sich auch auf der Erdoberfläche als sogenannte Schrittspannung bemerkbar machen. Ein Mensch, der sich zum Zeitpunkt des Blitzeinschlages in der Nähe der Erdungsanlage aufhält, könnte durch diese Schrittspannung gesundheitliche Schäden bis hin zum Tod davontragen.

Aus diesem Grund sieht unter anderem die in Deutschland relevante Normenreihe DIN EN 62305 (VDE 0185-305) für Bereiche besonderer Personengefährdung Maßnahmen zur Potentialsteuerung im Erdboden und damit zur Reduzierung der Schrittspannung vor. Diese Maßnahmen – mehrere um das Gebäude angeordnete Ringerder – haben jedoch den Nachteil, dass sie räumlich sehr ausgedehnt sind, was zu hohen Errichtungskosten sowohl beim benötigten Material als auch bei der Arbeitsleistung führt. Zudem sind solche Anlagen in dicht bebauten Gebieten unter Umständen auch aus Platzmangel nicht möglich. Andererseits sind in der Vergangenheit nur sehr wenige Blitzunfälle bekannt geworden, bei denen die Verletzungen der Unfallopfer bzw. die Todesopfer tatsächlich auf Schrittspannungen zurückzuführen waren. Somit stellen sich folgende Fragen:

1. Sind die bislang nach VDE errichteten Blitzschutz-Erdungsanlagen möglicherweise überdimensioniert?
2. Falls ja: In welchem Umfang lassen sich die Errichtungs-Vorgaben reduzieren, ohne die Schutzwirkung zu verlieren?
3. Falls nein: Sind noch aufwändigere Erdungsanlagen nötig, um einen ausreichenden Schutz zu gewährleisten?
4. Falls nein: Lassen sich Erdungsanlagen eventuell doch mit weniger Material- und Arbeitseinsatz errichten, ohne Schutzwirkung zu verlieren?

Mit der Beantwortung dieser Fragen im Rahmen einer systematischen, wissenschaftlichen Untersuchung beschäftigt sich die vorliegende Arbeit. Dabei konzentriert

## 10. Zusammenfassung und Ausblick

sie sich ausschließlich auf den Effekt der Schrittspannung und bezieht keine Stellung zu verwandten Themen wie Berührspannungen oder der für den inneren Blitzschutz relevanten Potentialanhebung.

Zuvor muss jedoch die Frage beantwortet werden, wie „ausreichender Schutz“ definiert ist, beziehungsweise ab welcher Höhe Schrittspannungen als gefährlich einzustufen sind. Dazu wurden in der vorliegenden Arbeit zunächst ausführlich die Grundlagen der Auswirkungen elektrischen Stromes auf den menschlichen Körper im Allgemeinen und das Herz im Besonderen erläutert. Auf dieser Grundlage wurde im Kontext eines Blitzunfalls das Auftreten von Herzkammerflimmern als größte Bedrohung für das Unfallopfer identifiziert, da Herzkammerflimmern – im Gegensatz zu den meisten anderen blitzverursachten Verletzungen – ohne sofortige notfallmedizinische Versorgung binnen kürzester Zeit zum Tode führt. Um zu bestimmen, Schrittspannungen welcher Höhe gerade eben noch kein Herzkammerflimmern auslösen können, wurden verschiedene Herangehensweisen aus der bestehenden Literatur zusammengetragen. Dies gestaltete sich schwierig, da sich – anders als zum Einfluss von Gleichspannung und netzfrequenten Wechselspannungen – nur sehr wenig Literatur mit Impulsspannungen und -strömen, insbesondere für den Strompfad Fuß–Fuß, wie er bei Schrittspannungen auftritt, beschäftigt. Daher wurden als zusätzlicher und neuer Ansatz Simulationen von elektrischen Strömen in einem dreidimensionalen Mensch-Modell („*HUGO*“) herangezogen, mit dessen Hilfe ebenfalls ein Grenzwert gefunden werden konnte.

Unter Abwägung aller Vor- und Nachteile dieser Bestimmungsmethoden wurde schließlich für die vorliegende Arbeit ein Schrittspannungsgrenzwert von 25 kV festgelegt, der zur Beurteilung der Blitzschutzerdungsanlagen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit dienen sollte. Dieser Wert wurde ermittelt für einen Impuls der Form 10/350  $\mu$ s eines Erstblitzes, der, wie Voruntersuchungen gezeigt haben, im Hinblick auf die Schrittspannung das kritischste Ereignis ist.

Als Mittel zur Untersuchung von Erdungsanlagen wurden dreidimensionale FEM-Computersimulationen gewählt, da diese das beste Verhältnis von Aufwand zu Nutzen bieten: rein experimentelle Untersuchungen hätten entweder an verkleinerten Modellen stattfinden müssen, bei denen die Übertragbarkeit nichtlinearer Einflüsse wie beispielsweise Bodenionisation fraglich gewesen wäre, oder hätten eines nicht zu rechtfertigenden Aufwandes an Versuchstechnik bedurft. Die Simulationen wurden nicht transient, sondern als stationäre Strömungsfelder durchgeführt, da Voruntersuchungen gezeigt hatten, dass auf diese Weise in erheblichem Umfang Rechenzeit eingespart werden kann und somit in gegebener Zeit mehr Erdungsvarianten untersucht werden können, sich gleichzeitig aber die damit einhergehenden Fehler und Abweichungen gegenüber einer transienten Simulation noch in einem akzeptablen Rahmen bewegen. Als Besonderheit wurde in den Simulationen zudem optional der Effekt der Bodenionisierung, also eines nichtlinearen Verhaltens des Erdbodens berücksichtigt.

Nachdem in weiteren Voruntersuchungen das grundsätzliche Simulationsmodell validiert sowie Regeln und Methoden zur Bestimmung der Schrittspannung aus den FEM-Simulationsergebnissen definiert wurden, wurden systematisch zahlreiche Er-



dungsvarianten untersucht und die Simulationsergebnisse in Bezug auf Schrittspannungen mit dem zuvor festgelegten Grenzwert verglichen. Dies geschah stets für vier unterschiedliche, zuvor definierte Gebäudegrößen, die drei in DIN EN 62305-1 definierten maximalen Stromamplituden für Erstblitze, sowie für lineares und nicht-lineares Bodenverhalten. Zunächst wurden dabei „konventionelle“ Erdungskonzepte betrachtet, die sich im Wesentlichen am aktuellen Stand der Technik und der gängigen Ausführungspraxis orientierten (siehe Kapitel 7.1). Nachdem sich bereits hier Tendenzen zur Wirksamkeit beziehungsweise Nicht-Wirksamkeit einzelner Lösungen abzeichneten, wurden weitere „nichtkonventionelle“ Erdungskonzepte (siehe Kapitel 7.2) auf der Basis eigener Ideen untersucht.

Im Anschluss daran wurden die Simulationsergebnisse gesammelt analysiert und diskutiert (Kapitel 8). Dazu wurde zunächst eine Wirksamkeitsmatrix aufgestellt, an Hand derer sich leicht erkennen lässt, welche Erdungskonzepte in Abhängigkeit von Gebäudegröße, Gefährdungspegel und Bodenverhalten ausreichenden Schutz vor gefährlichen Schrittspannungen bieten und welche nicht. Dabei lässt sich eine deutliche Abhängigkeit unter anderem von der Gebäudegröße erkennen: Während große Gebäude bereits mit relativ einfachen Erdungsanlagen ausreichend geschützt sind, bieten bei mittelgroßen Gebäuden in Bezug auf die nach VDE vorgesehenen Maßnahmen nur aufwändige Ringerder-Anlagen ausreichenden Schutz. Bei kleinen Gebäuden genügen sogar selbst diese nicht oder nur unter bestimmten Nebenbedingungen wie einem eingeschränkten Gefährdungspegel.

Von den nichtkonventionellen Erdungskonzepten erwiesen sich die meisten als nicht effektiv oder wiesen nur ein schlechtes Kosten-Nutzen-Verhältnis auf. Als wichtige positive Erkenntnis ergab sich jedoch auch, dass die Wirksamkeit einer Ringerder-Anlage im Wesentlichen von der Position (Verlegtiefe und Abstand vom Gebäude) des äußersten Ringes bestimmt wird. Die mittleren Ringe können dagegen in relativ großen Abständen verschoben oder teilweise auch komplett weggelassen werden, ohne die Wirksamkeit der gesamten Anlage zu stark negativ zu beeinflussen.

Generell konnte auch festgestellt werden, dass Modifikationen von Erdungskonzepten, die auf den ersten Blick intuitiv sinnvoll erscheinen, wie beispielsweise das Hinzufügen eines einzelnen Ringerders zu einem Fundamenterder, tatsächlich kontraproduktiv sein können und zu höheren statt niedrigeren Schrittspannungen führen können.

Aufbauend auf der Auswertung und Diskussion der Simulationsergebnisse wurden schließlich einige allgemeine Regeln abgeleitet, die als Handreichungen für die praktische Auslegung konkreter Blitzschutz-Erdungsanlagen dienen können. Diese sind dabei eher als erste Anhaltspunkte zu verstehen und können gerade bei unüblichen Konstellationen nicht eine detaillierte Einzelfall-Untersuchung ersetzen.

An Hand zweier ausgewählter Sonderfälle aus der Praxis – einer Windenergieanlage und einer kleinen Schutzhütte – wurde zudem demonstriert, dass je nach konkreter Aufgabenstellung ein vollständiger Schutz vor gefährlichen Schrittspannungen sehr leicht oder aber sehr schwierig bis de facto gar nicht zu realisieren ist.

Vor diesem Hintergrund lassen sich auch die eingangs gestellten Fragen wie folgt beantworten: Die gegenwärtig in der VDE-Blitzschutznorm enthaltenen Vorgaben zur

## 10. Zusammenfassung und Ausblick

Schrittspannungssteuerung sind nur für große Gebäude überdimensioniert. Hier kann bereits mit deutlich weniger als dem vorgesehenen Aufwand ein gutes Ergebnis bezüglich der Schrittspannungssteuerung erzielt werden. Insbesondere bei mittelgroßen Gebäuden kann zwar der Flächenbedarf einer Erdungsanlage nur wenig eingeschränkt werden, es besteht aber die Möglichkeit, durch geeignete Variation der VDE-Vorgaben zumindest den Material- und Arbeitsaufwand zu reduzieren. Bei sehr kleinen Gebäuden bieten jedoch selbst aufwändige Erdungsanlagen gemäß VDE keinen umfassenden Schutz, sodass hier im Bedarfsfall noch umfangreichere Erdungskonzepte Verwendung finden müssen.

In jedem Fall muss jedoch grundsätzlich immer, wie bereits in der Einleitung geschrieben, berücksichtigt werden, dass beim Schutz vor blitzverursachten Schrittspannungen mindestens zwei Faktoren zusammenkommen, die jeweils für sich einer statistischen Streuung unterliegen: Die individuelle Ausprägung eines Blitzereignisses (insbesondere die Amplitude(n) des/der Blitzentladungen) sowie die individuelle Physik eines potentiellen Unfallopfers. Obwohl in dieser Arbeit möglichst immer Worst-Case-Betrachtungen angestellt wurden, führen diese statistischen Einflüsse dazu, dass es keine 100%ige Sicherheit gibt und prinzipbedingt auch nicht geben kann.

Dass der aktuelle Stand der Technik bei Blitzschutz-Erdungsanlagen wie Tiefen- und Ringerder im Vergleich mit anderen Erdungskonzepten so gut abschneidet, ist insofern positiv zu bewerten, als dass von den zahllosen real existierenden Blitzschutzanlagen zumindest keine übermäßige Personengefährdung ausgeht. Dennoch sollte im Sinne einer Verbesserung der Personensicherheit für die Zukunft angestrebt werden, in der Blitzschutznormung der DIN-EN-62305-Reihe (VDE-Reihe 0185) die generelle Schrittspannungs-Problematik stärker zu gewichten, als dies bislang der Fall ist. Hier könnte beispielsweise die Nennung eines Grenzwertes und die Forderung des Nachweises (mittels Rechnung oder Messung durch den Errichter) der Einhaltung dieses Grenzwertes ein Ansatz sein, wie dies in der Normung zur Errichtung von Mittel- und Hochspannungsanlagen (VDE-Reihe 0101) bereits heute der Fall ist.

Zumindest sollte jedoch bei Planern und Errichtern generell das Bewusstsein für die grundsätzliche Gefährlichkeit von Schrittspannungen und das Gefährdungspotential durch unüberlegte Auslegung von Blitzschutz-Erdungsanlagen geweckt werden und mögliche Lösungsansätze, auch mit Hilfe der hier vorgestellten Ergebnisse, aufgezeigt werden. Unter Bedingungen, die von den hier zugrunde gelegten Rahmenbedingungen deutlich abweichen (Gebäudeform und -größe, Bodenleitfähigkeit usw.), kann auch die individuelle Berechnung oder Simulation eines konkreten Bauvorhabens angezeigt sein.

# Anhang



# A. Quellcode des verwendeten Skriptes

**Zusammenfassung:** *Dieser Anhang enthält den Quellcode des zur Berechnung von Schrittspannungen aus elektrischen Potentialen verwendeten awk-Skriptes sowie eine Beschreibung von dessen Funktion.*

## A.1. Funktionsbeschreibung

Das Skript erwartet als Eingabe Textdateien, die zeilenweise Potentialwerte enthalten. Dabei wird in jeder Zeile zuerst eine Ortsangabe als Entfernung vom Start in Metern und danach, durch Leerzeichen o.ä. getrennt, ein Potentialwert erwartet. Nach dem Start liest das Skript zunächst so viele Zeilen aus der Eingabedatei in einen internen Puffer, dass der letzte zwischengespeicherte Entfernungswert gerade größer ist als die angegebene Schrittweite. (Als Startwert wird eine Entfernung von 0 erwartet.) Danach wird mit der ersten Zeile im Puffer begonnen und die Potentialdifferenz – also die Schrittspannung – zwischen diesem Punkt und dem Punkt in genau einer Schrittweite Entfernung berechnet. Ist im Puffer kein Wertepaar vorhanden, dessen Entfernungswert dem Zielwert entspricht, wird das Potential mit Hilfe der Funktion „INTERPOLATE“ aus den beiden entfernungs­mäßig unmittelbar benachbarten Wertepaaren im Puffer linear interpoliert. Danach wird das Ergebnis der Berechnung ausgegeben, wobei jede Ausgabezeile ebenfalls zuerst eine Entfernungsangabe in Metern und einen Schrittspannungswert enthält. Im Anschluss daran wird das erste Wertepaar aus dem Puffer gelöscht, die weiteren Wertepaare „aufgerückt“ und am Ende des Puffers die nächste Zeile aus der Eingabedatei eingelesen.

Der Aufruf des Skriptes erfolgt dabei nach folgendem Muster:

```
gawk -f ssp.awk step=1 eingabe.txt > ausgabe.txt
```

Dabei ist

- „ssp.awk“ der Dateiname des Skriptes und kann beliebig gewählt werden,
- „step“ der Parameter zur Wahl der Schrittweite, hier 1 m,
- „eingabe.txt“ die Textdatei, welche die Potentialangaben enthält und
- „ausgabe.txt“ die Textdatei, in welche die Ergebnisse geschrieben werden.

## A. Quellcode des verwendeten Skriptes

### A.2. Quellcode

```
1 #####
2 #
3 # function INTERPOLATE
4 #
5 # Do a linear interpolation between two 2D points
6 #
7 #####
8
9 function INTERPOLATE(x1, y1, x2, y2, x3,    y3)
10 {
11     y3 = y1 + (((y2-y1)/(x2-x1))*(x3-x1));
12     return y3;
13 }
14
15 ### END function INTERPOLATE
16
17 ### BEGIN main program
18
19 {
20     # At first, fill up "readahead" buffer
21     if ($1 < step) {
22
23         # Skip text lines at the beginning
24         while (!(match($1, "[0-9]")) {
25             getline;
26         }
27         i = 0;
28
29         # Fill the buffer, take care that it will contain one line
30         # over step width
31         do {
32             r[i] = $1;
33             pot[i] = $2;
34             i++;
35             getline;
36         } while (r[i-1] < r[1]+step)
37
38         # store size of buffer for later use
39         # (Step width of raw data is assumed to be constant over
40         # the whole input data.)
41         buffersize = i;
42
43     } ### END buffer filling
44
45     # Get second value ('current' r-value + step width) from
46     # readahead buffer, calculate step voltage and print it
47     i = 0;
```

```

48  while ((r[i] < (r[0] + step))) {
49      i++
50  }
51  pot_int = INTERPOLATE(r[i-1],pot[i-1],r[i],pot[i],r[0]+step);
52  stepvoltage = pot[0] - pot_int;
53  if (stepvoltage > 0) {
54      print r[0] "~~~~~" stepvoltage;
55  } else {
56      print r[0] "~~~~~" (-1*stepvoltage);
57  }
58
59  # cycle readahead buffer
60  for (i=0; i<(bufferize-1); i++) {
61      r[i] = r[i+1];
62      pot[i] = pot[i+1];
63  }
64  r[bufferize-1] = $1;
65  pot[bufferize-1] = $2;
66
67  }
68
69  ### END main program

```





## B. Zusätzliche Graphen

**Zusammenfassung:** *Dieser Anhang enthält weitere Graphen von Simulationsergebnissen*

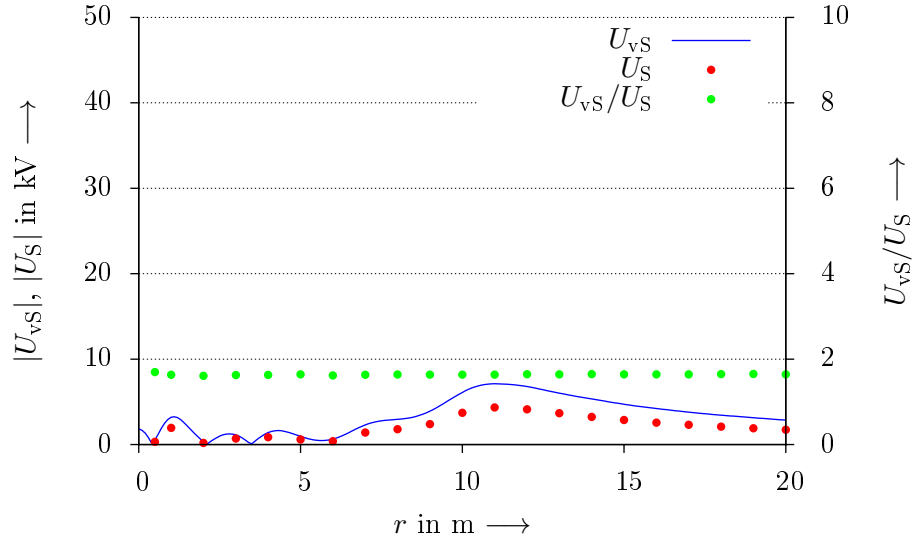
Die Graphen in diesem Anhang sind Zusatzinformationen zu folgenden Simulationen:

- Verhältnis von leerlaufender zu tatsächlicher Schrittspannung: Seite 178–180
- Konventionelle Erdungskonzepte: Seite 181–225
- Nichtkonventionelle Erdungskonzepte: Seite 226–245
- Sonderfälle: Seite 246–252

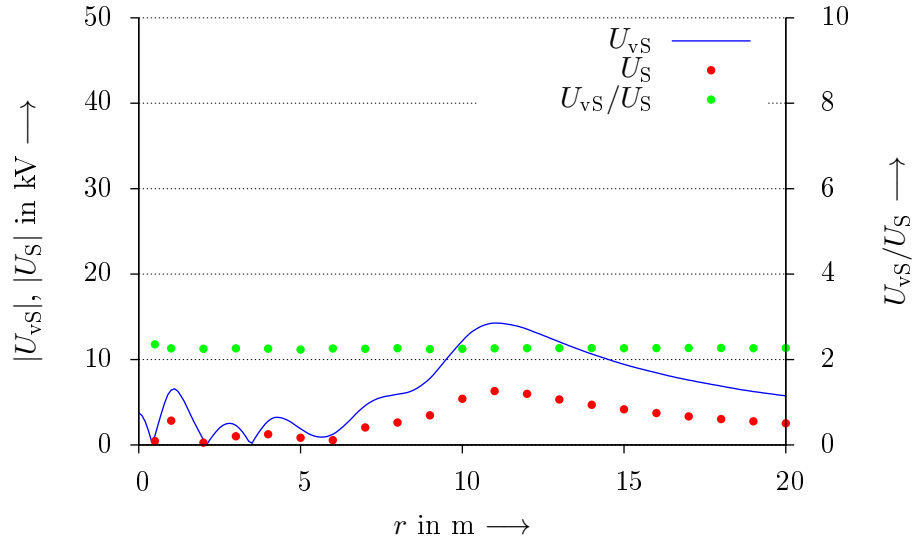
### B.1. Leerlaufende und tatsächliche Schrittspannung

Die Graphen in diesem Abschnitt sind Ergänzungen zur Betrachtung des Unterschiedes zwischen leerlaufender und tatsächlicher Schrittspannung in Kapitel 6.1.4.

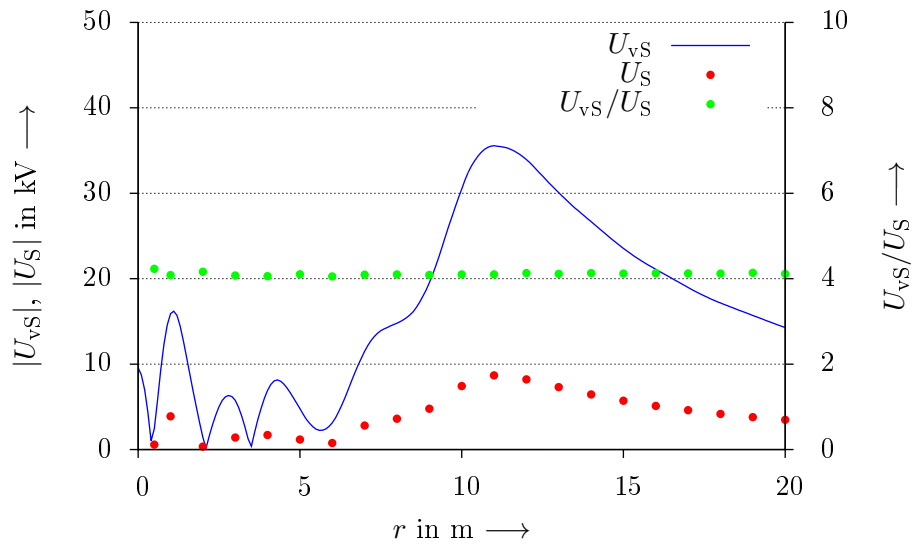
## B. Zusätzliche Graphen



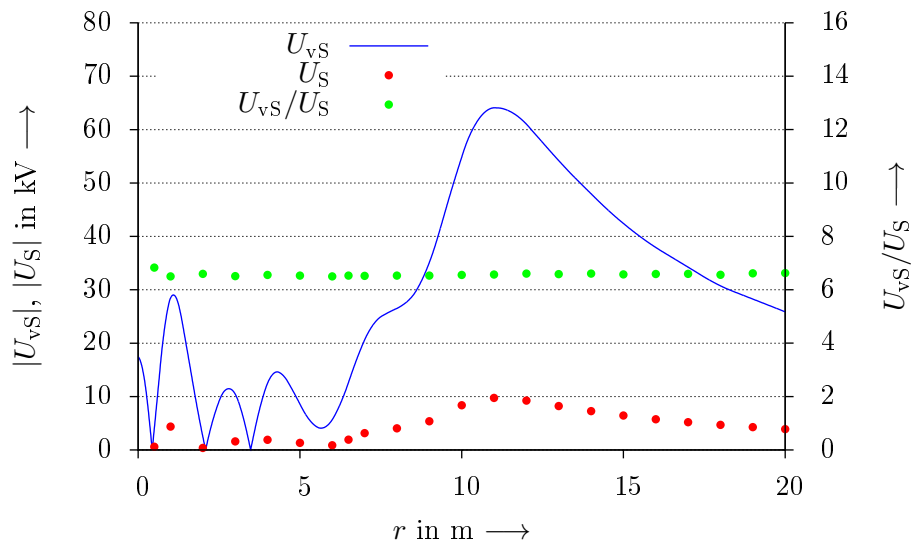
**Abbildung B.1.:** Simulationsergebnisse von leerlaufender und tatsächlicher Schrittspannung bei linearem Boden mit  $\varrho = 100 \Omega\text{m}$  an einer Vier-Ringerder-Anlage nach VDE um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  ( $I = 100 \text{ kA}$ )



**Abbildung B.2.:** Simulationsergebnisse von leerlaufender und tatsächlicher Schrittspannung bei linearem Boden mit  $\varrho = 200 \Omega\text{m}$  an einer Vier-Ringerder-Anlage nach VDE um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  ( $I = 100 \text{ kA}$ )

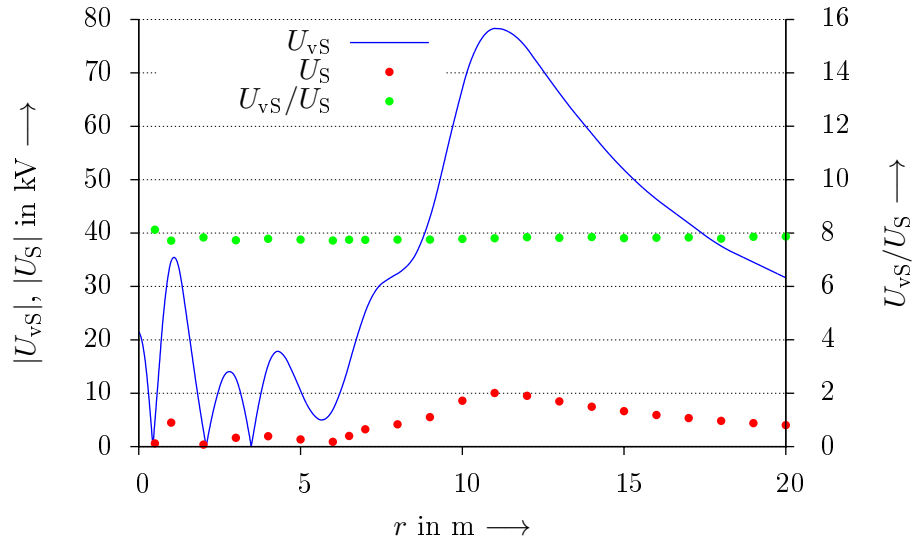


**Abbildung B.3.:** Simulationsergebnisse von leerlaufender und tatsächlicher Schrittspannung bei linearem Boden mit  $\varrho = 500 \Omega\text{m}$  an einer Vier-Ringerder-Anlage nach VDE um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  ( $I = 100 \text{ kA}$ )

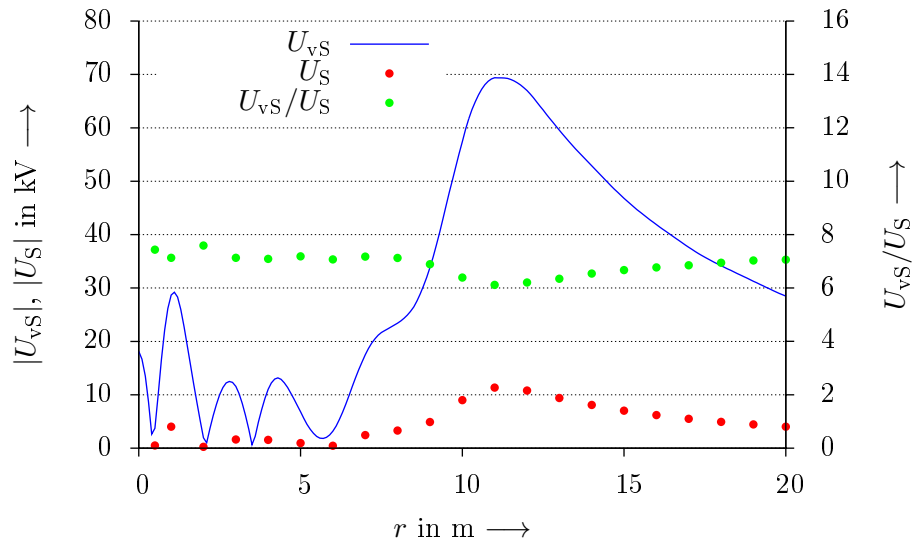


**Abbildung B.4.:** Simulationsergebnisse von leerlaufender und tatsächlicher Schrittspannung bei linearem Boden mit  $\varrho = 900 \Omega\text{m}$  an einer Vier-Ringerder-Anlage nach VDE um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  ( $I = 100 \text{ kA}$ )

## B. Zusätzliche Graphen



**Abbildung B.5.:** Simulationsergebnisse von leerlaufender und tatsächlicher Schrittspannung bei linearem Boden mit  $\varrho = 1100 \Omega\text{m}$  an einer Vier-Ringerder-Anlage nach VDE um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  ( $I = 100 \text{ kA}$ )



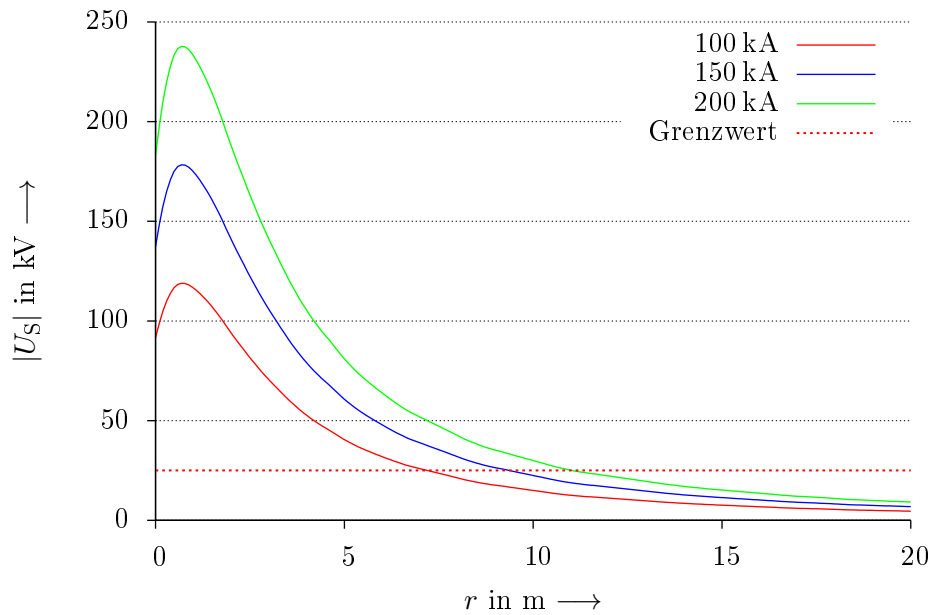
**Abbildung B.6.:** Simulationsergebnisse von leerlaufender und tatsächlicher Schrittspannung bei nichtlinearem Boden mit  $\varrho = 100 \dots 1000 \Omega\text{m}$

## **B.2. Konventionelle Erdungskonzepte**

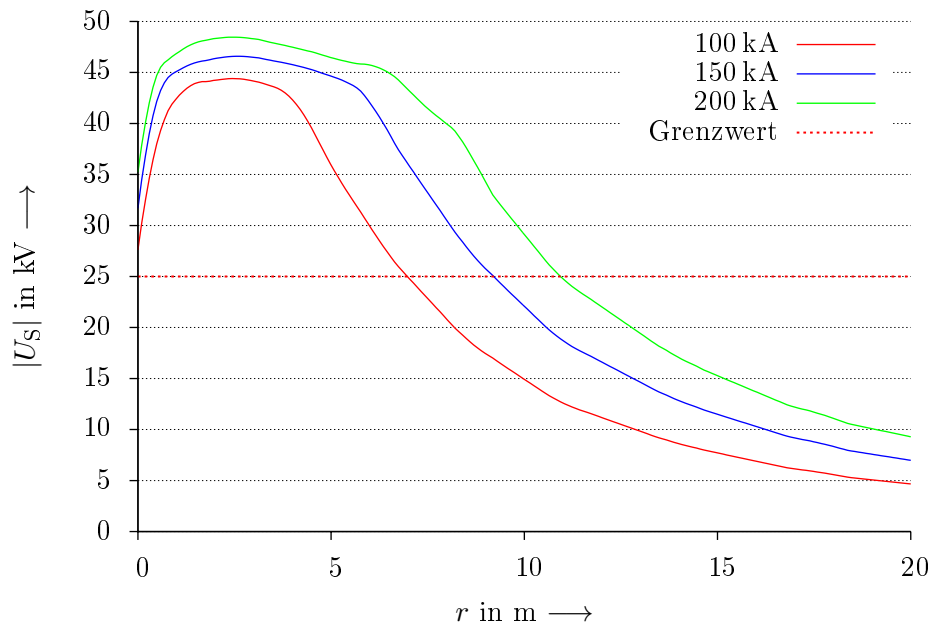
Die Graphen in diesem Abschnitt sind Ergänzungen zu den Simulationen konventioneller Erdungskonzepte in Kapitel 7.1.

- Fundamenterder: Seite 182–185
- Fundamenterder plus Ringerder, normgemäße Verlegung: Seite 186–201
- Tiefenerder, 6 m und 9 m lang, im Keller beginnend: Seite 202–205
- Tiefenerder, 6 m und 9 m lang, im Keller beginnend und die obersten 1,5 m isoliert: Seite 206–209
- Tiefenerder, 6 m und 9 m lang, im Keller beginnend und die obersten 3 m isoliert: Seite 210–213
- Tiefenerder, 6 m und 9 m lang, ebenerdig beginnend: Seite 214–217
- Schrägerder, Typ 1: Seite 218–221
- Schrägerder, Typ 2: Seite 222–225

## B. Zusätzliche Graphen

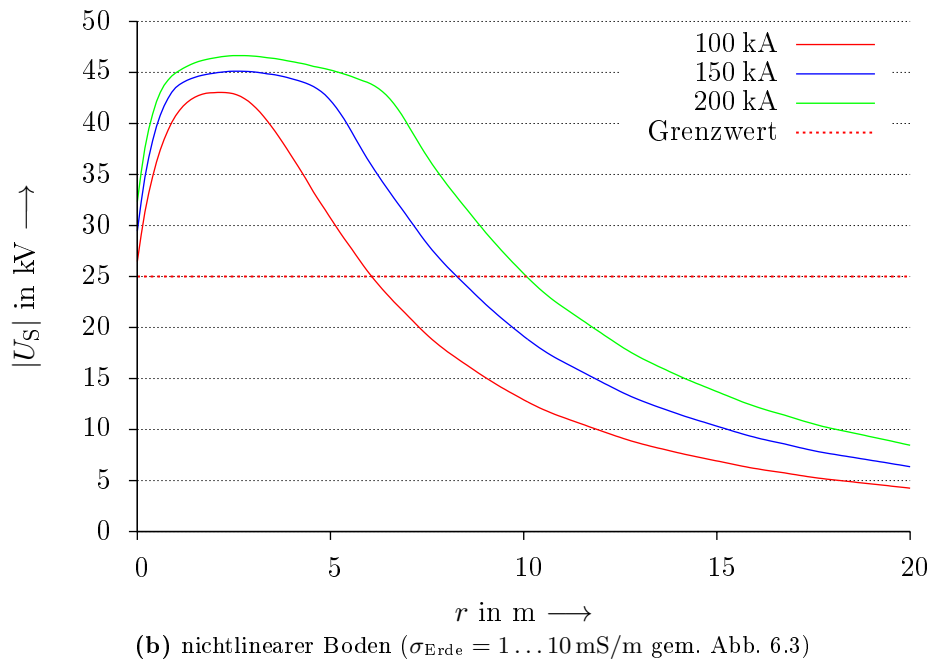
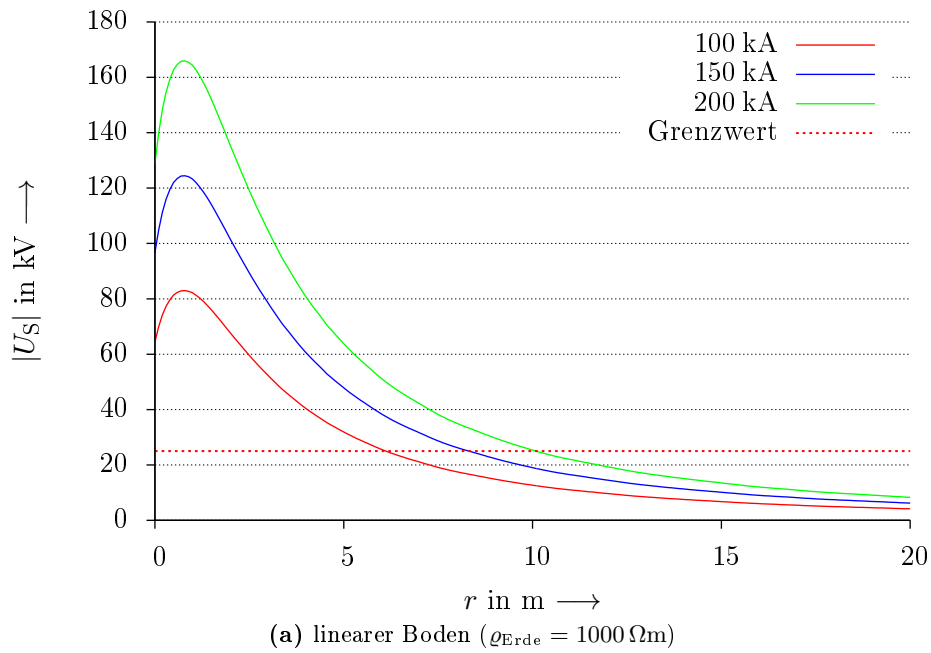


(a) linearer Boden ( $\rho_{\text{Erde}} = 1000 \Omega\text{m}$ )



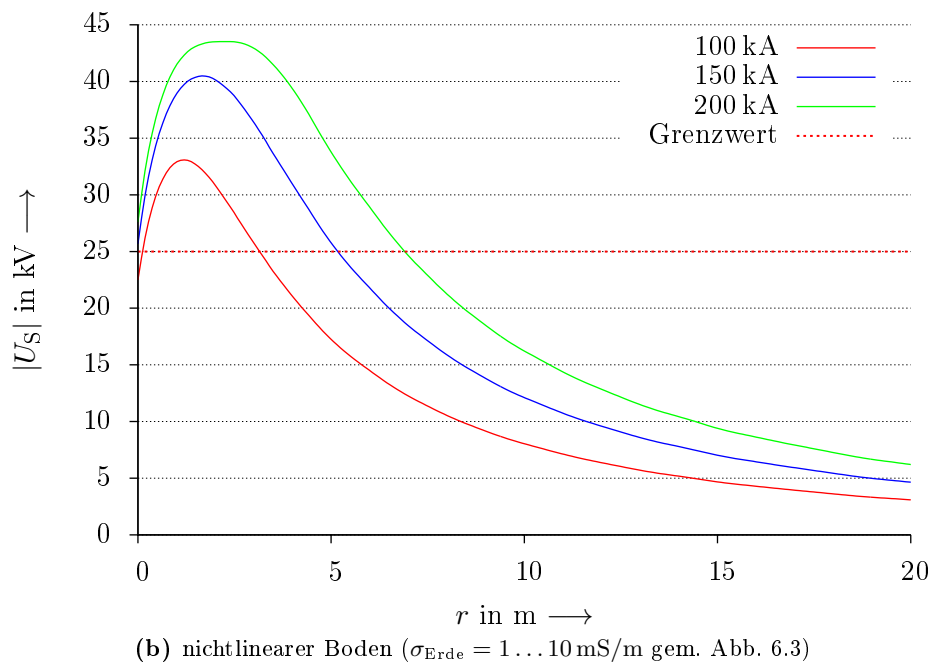
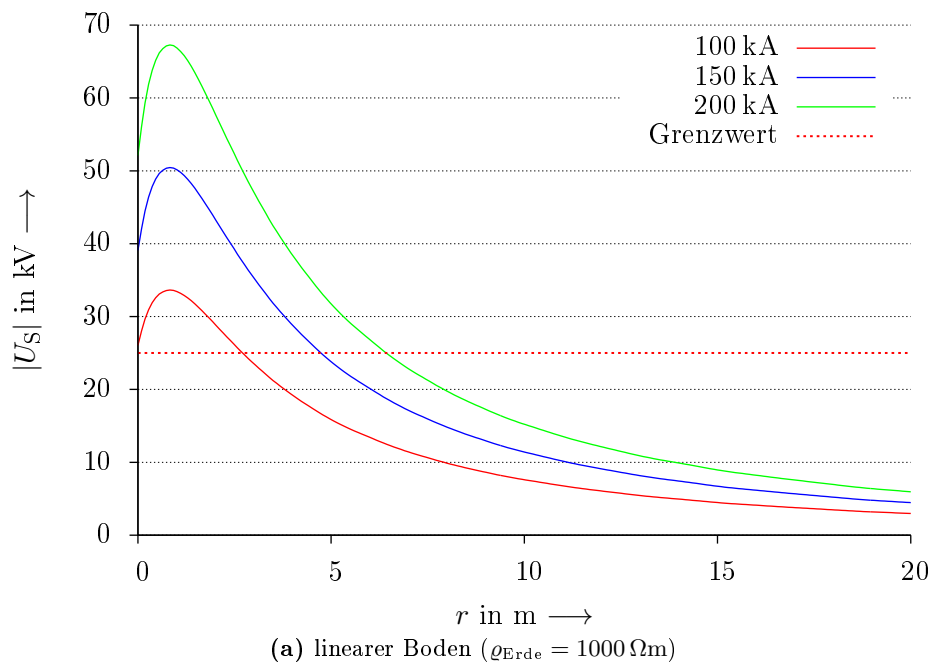
(b) nichtlinearer Boden ( $\sigma_{\text{Erde}} = 1 \dots 10 \text{ mS/m}$  gem. Abb. 6.3)

**Abbildung B.7.:** Schrittspannungen bei Verwendung eines Fundamenterders um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$



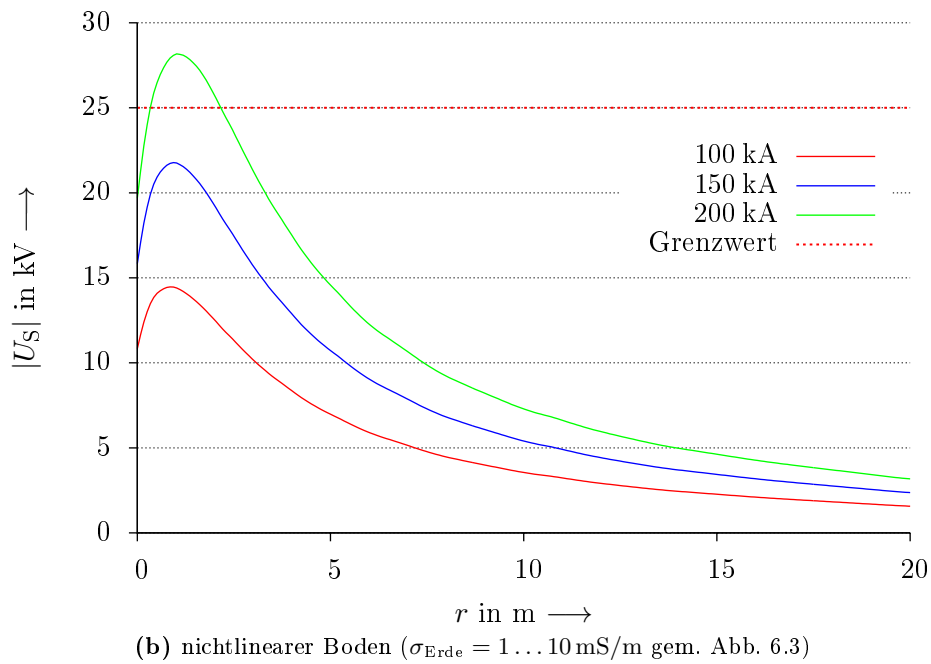
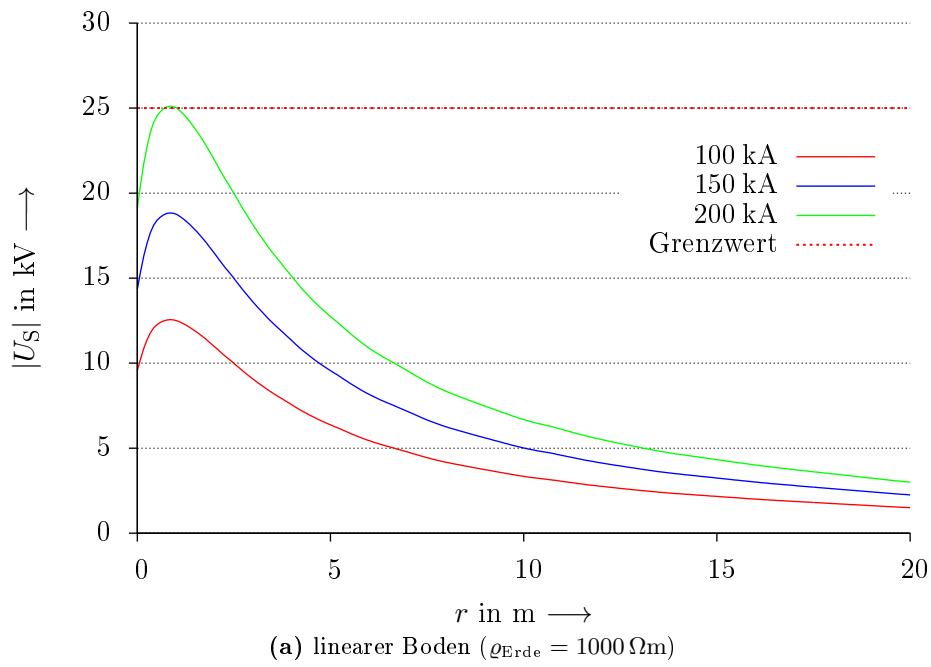
**Abbildung B.8.:** Schrittspannungen bei Verwendung eines Fundamenterders um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen



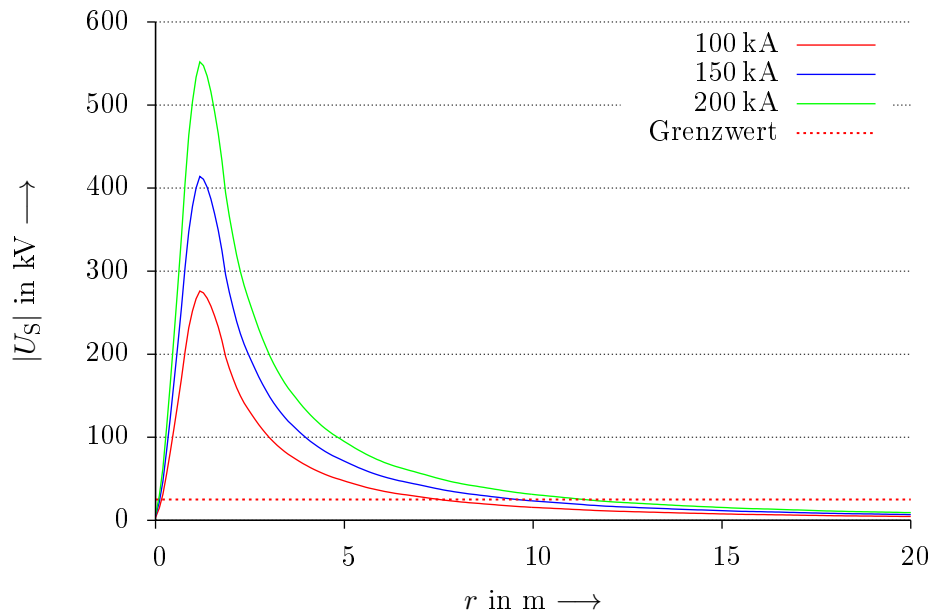
**Abbildung B.9.:** Schrittspannungen bei Verwendung eines Fundamenterders um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$



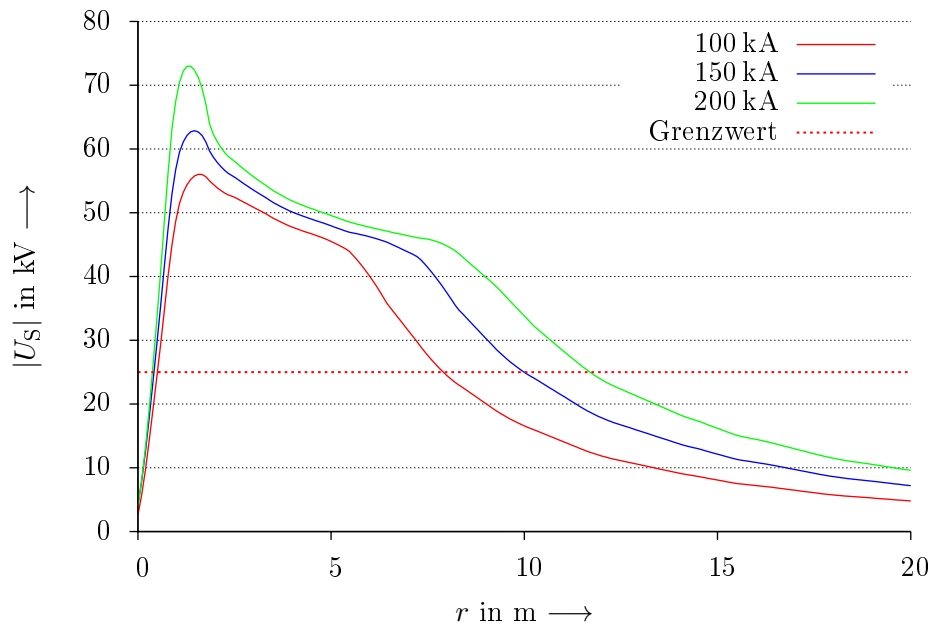


**Abbildung B.10.:** Schrittspannungen bei Verwendung eines Fundamenterders um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen

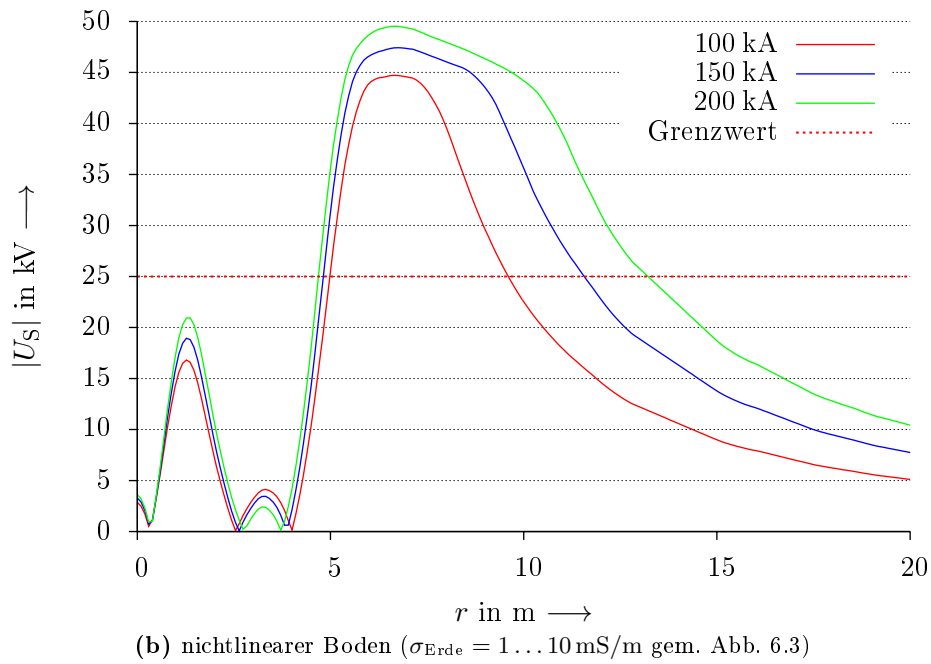
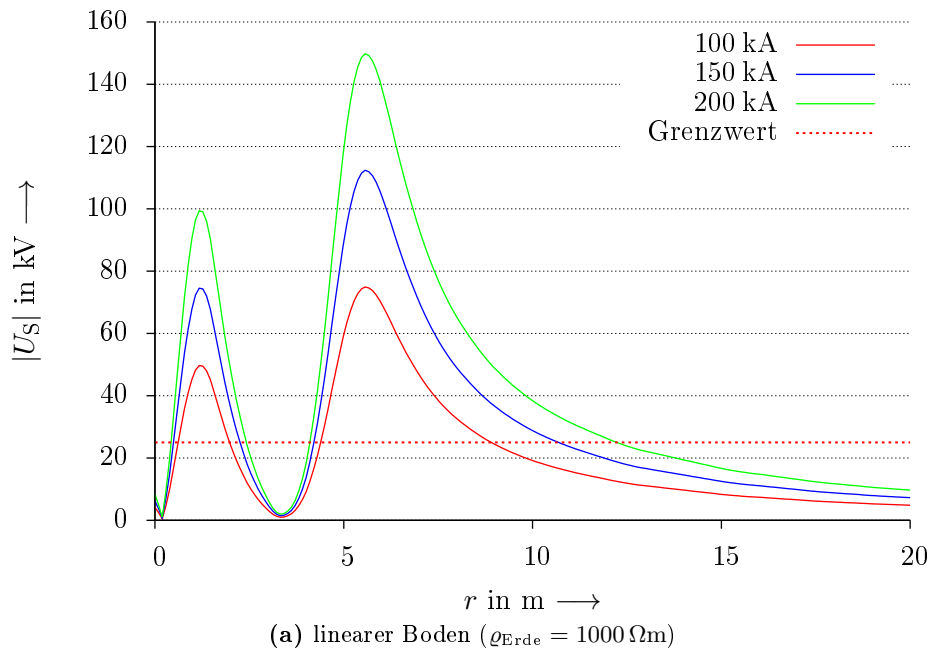


(a) linearer Boden ( $\varrho_{\text{Erde}} = 1000 \Omega\text{m}$ )



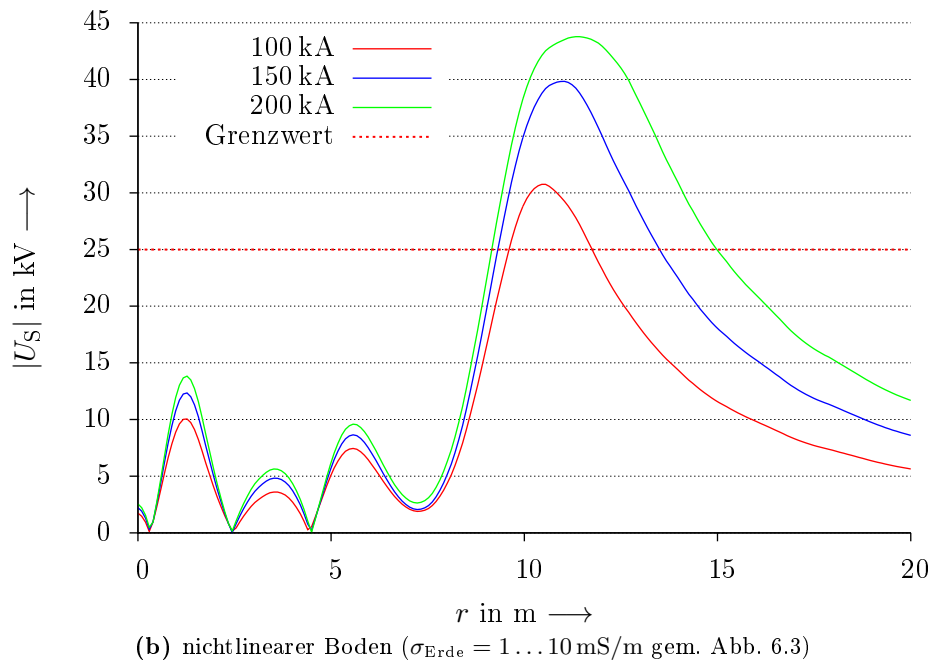
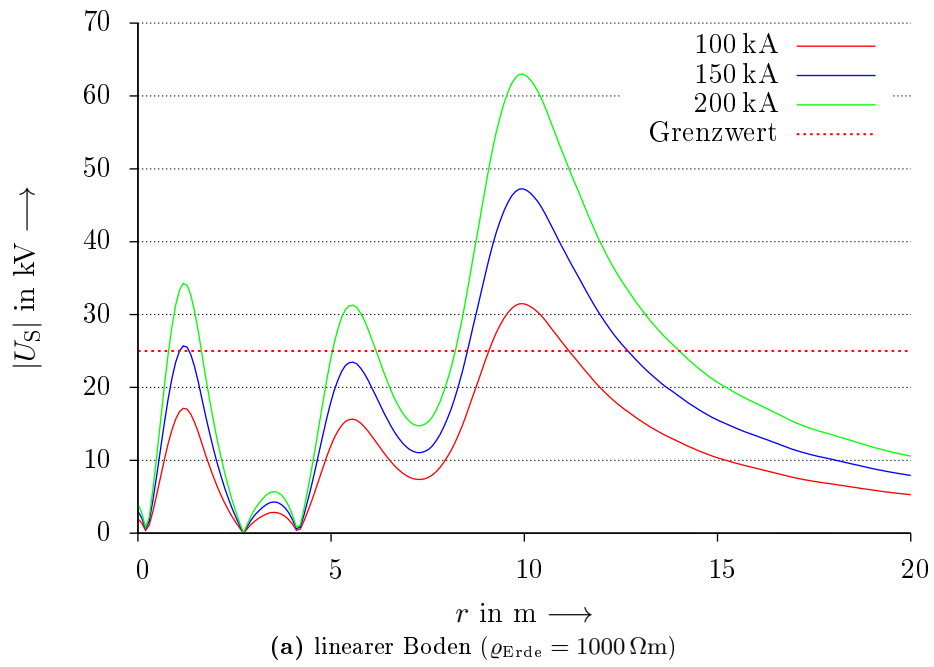
(b) nichtlinearer Boden ( $\sigma_{\text{Erde}} = 1 \dots 10 \text{ mS/m}$  gem. Abb. 6.3)

**Abbildung B.11.:** Schrittspannungen bei Verwendung eines Ringerders um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$

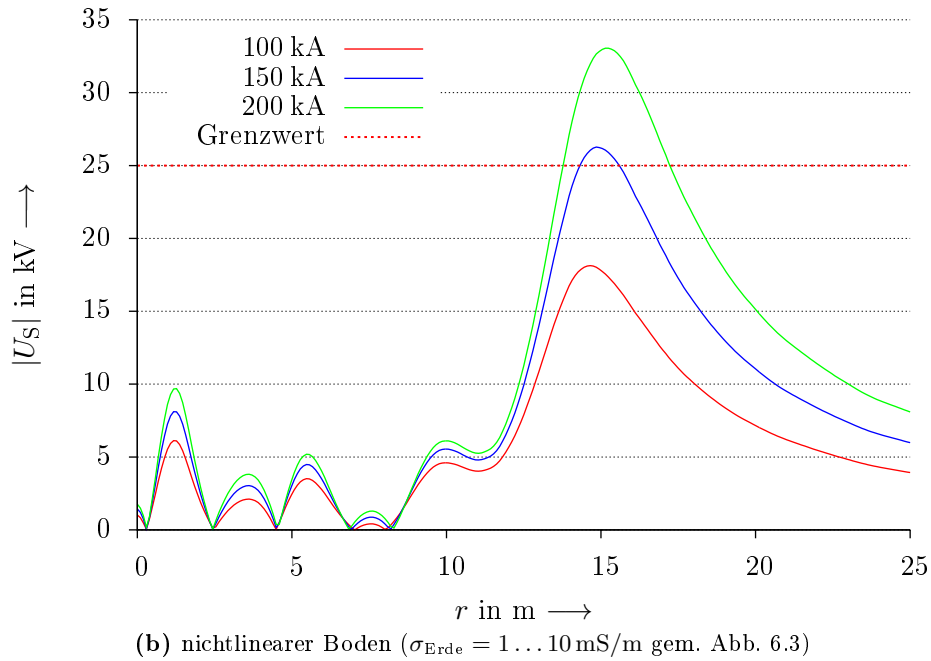
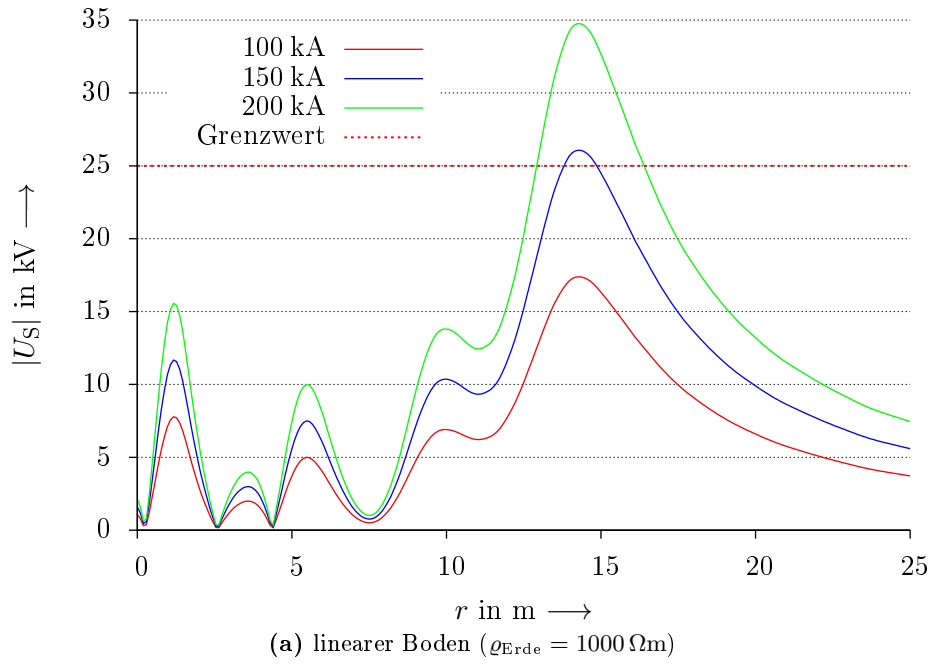


**Abbildung B.12.:** Schrittspannungen bei Verwendung von zwei Ringerdern um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen

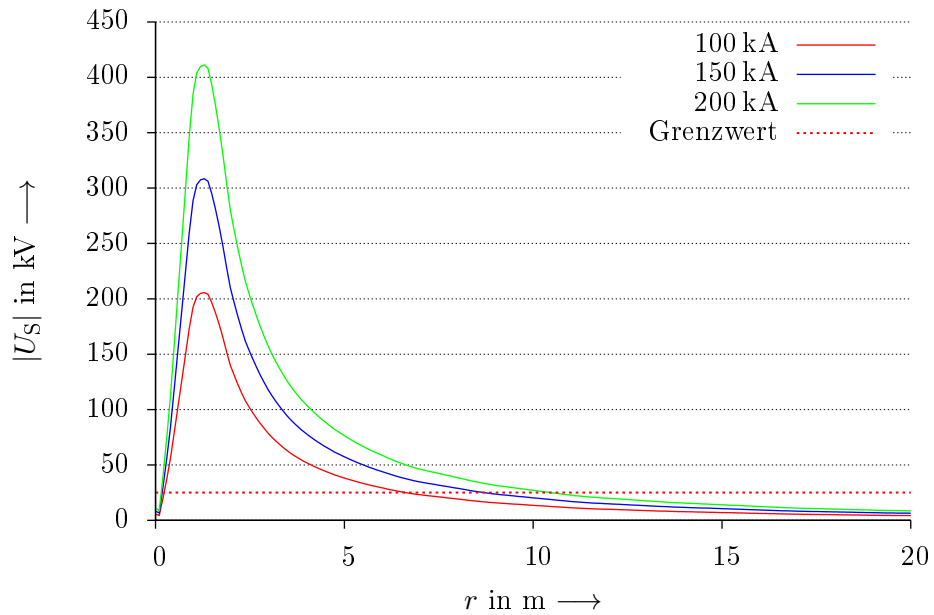


**Abbildung B.13.:** Schrittspannungen bei Verwendung von drei Ringerdern um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$

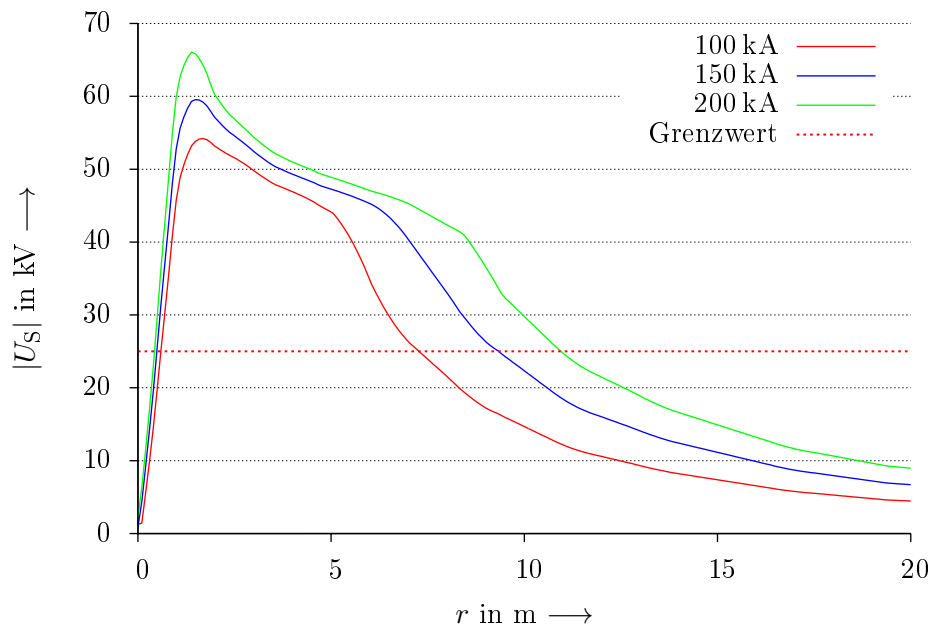


**Abbildung B.14.:** Schrittspannungen bei Verwendung von vier Ringerdern um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen

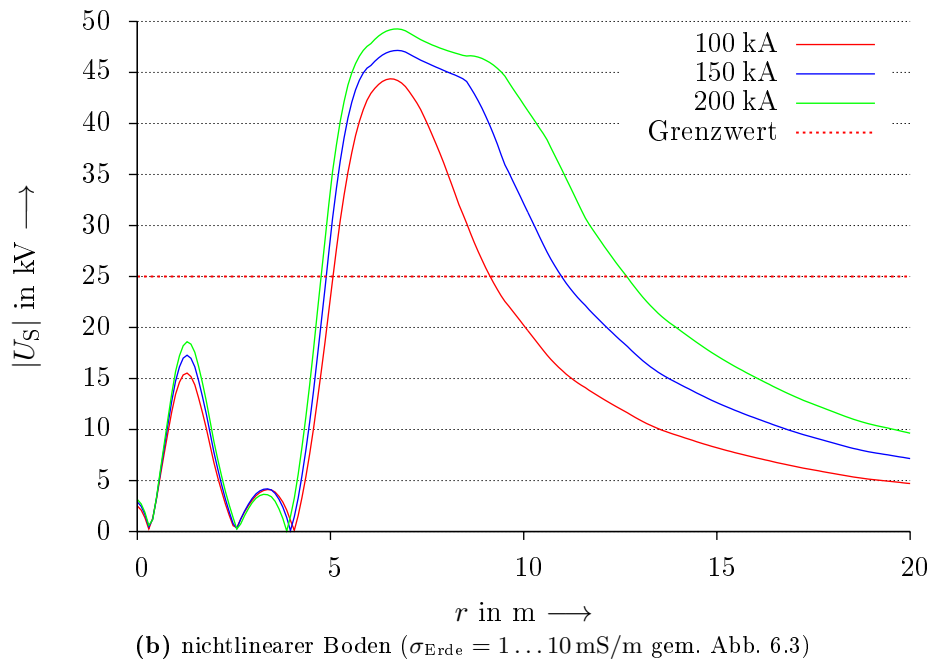
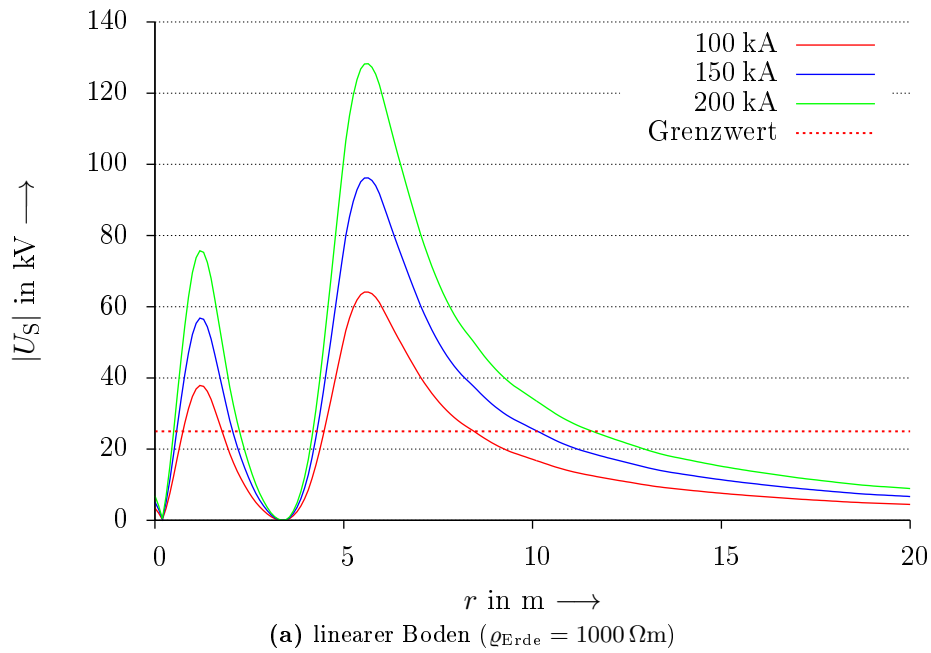


(a) linearer Boden ( $\rho_{\text{Erde}} = 1000 \Omega\text{m}$ )



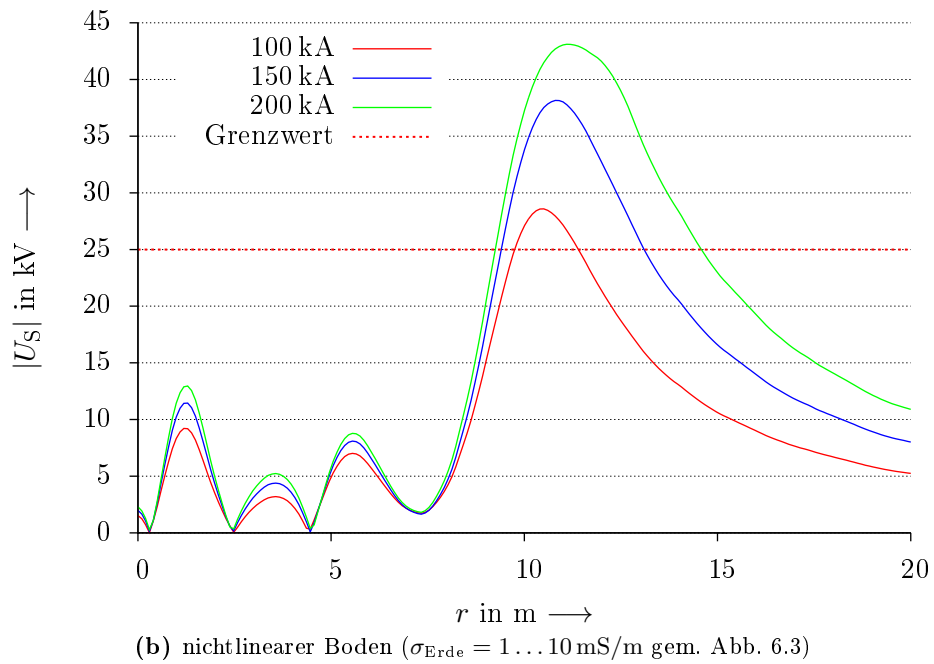
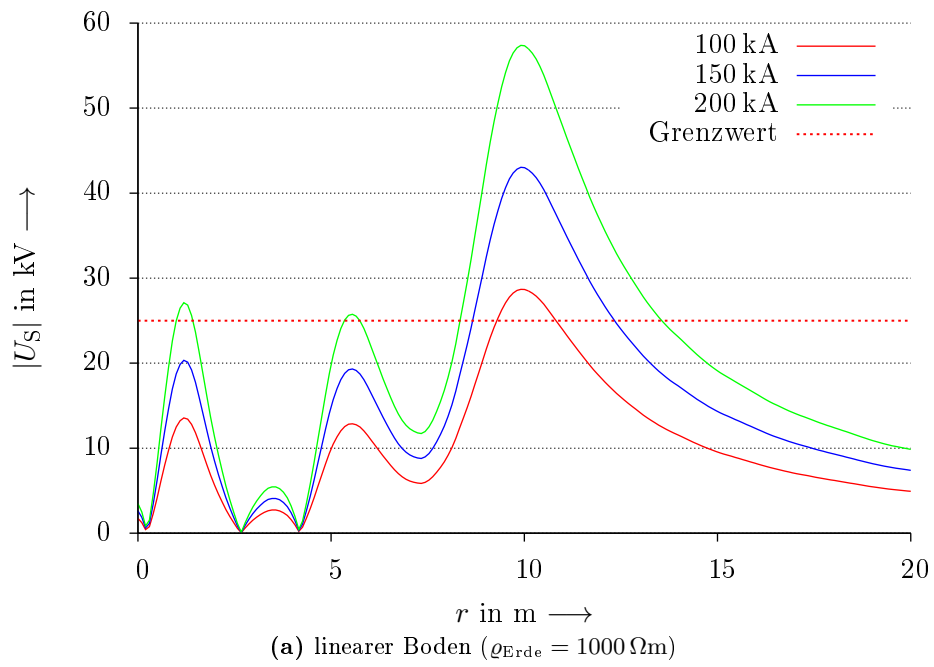
(b) nichtlinearer Boden ( $\sigma_{\text{Erde}} = 1 \dots 10 \text{ mS/m}$  gem. Abb. 6.3)

**Abbildung B.15.:** Schrittspannungen bei Verwendung eines Ringerders um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$



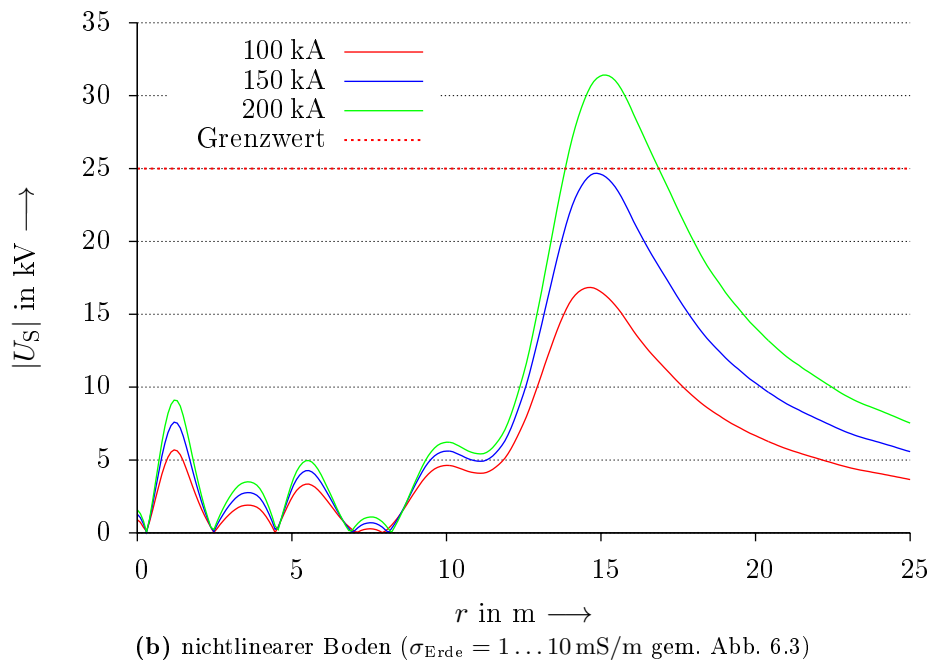
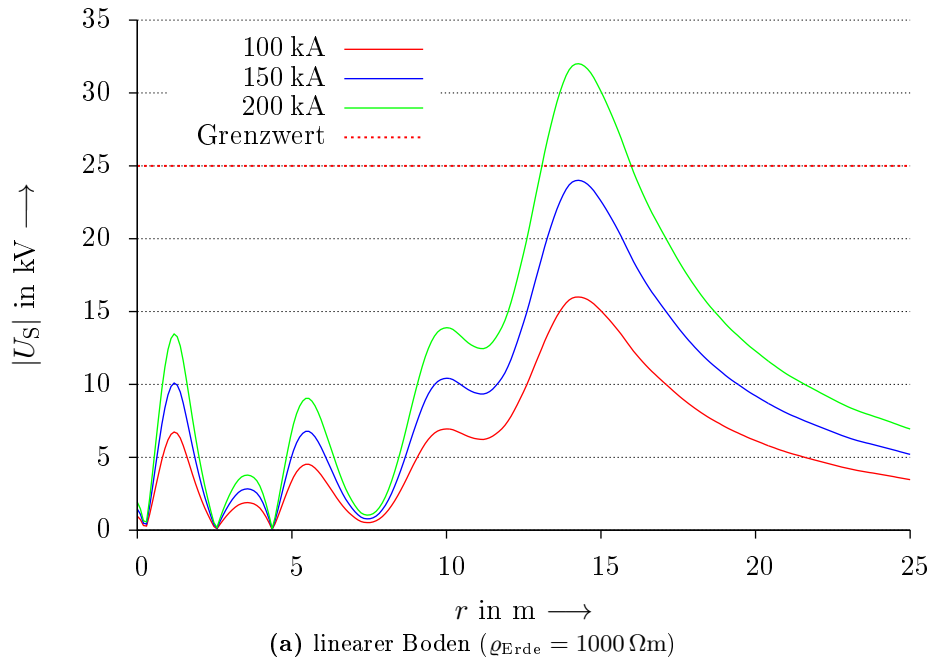
**Abbildung B.16.:** Schrittspannungen bei Verwendung von zwei Ringerdern um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen



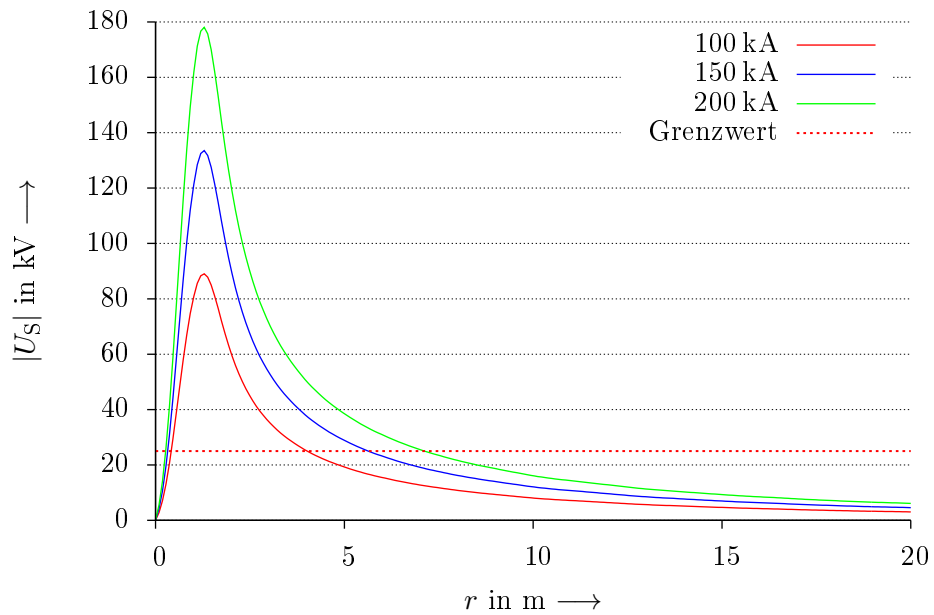
**Abbildung B.17.:** Schrittspannungen bei Verwendung von drei Ringerdern um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$



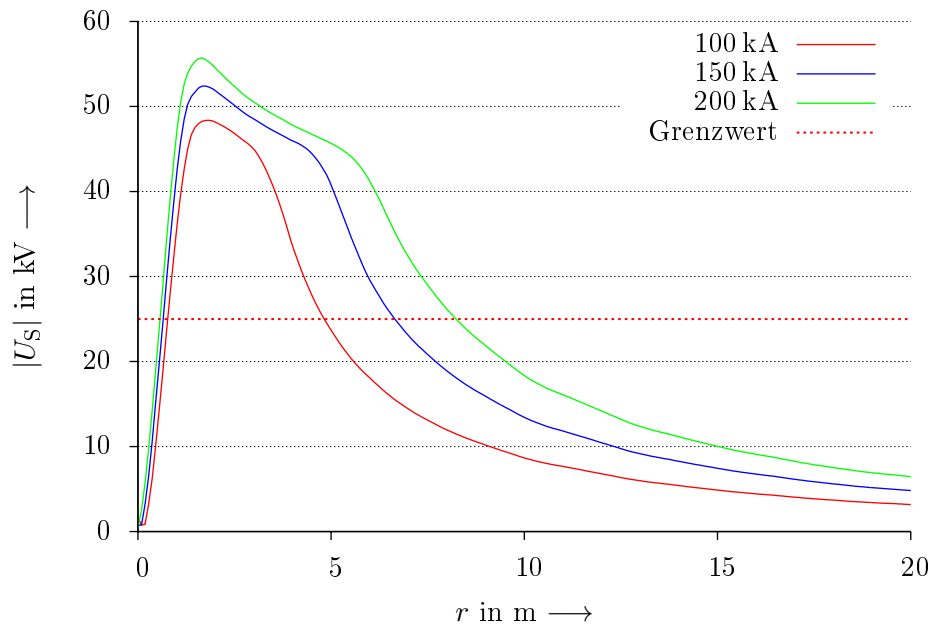


**Abbildung B.18.:** Schrittspannungen bei Verwendung von vier Ringerdern um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen

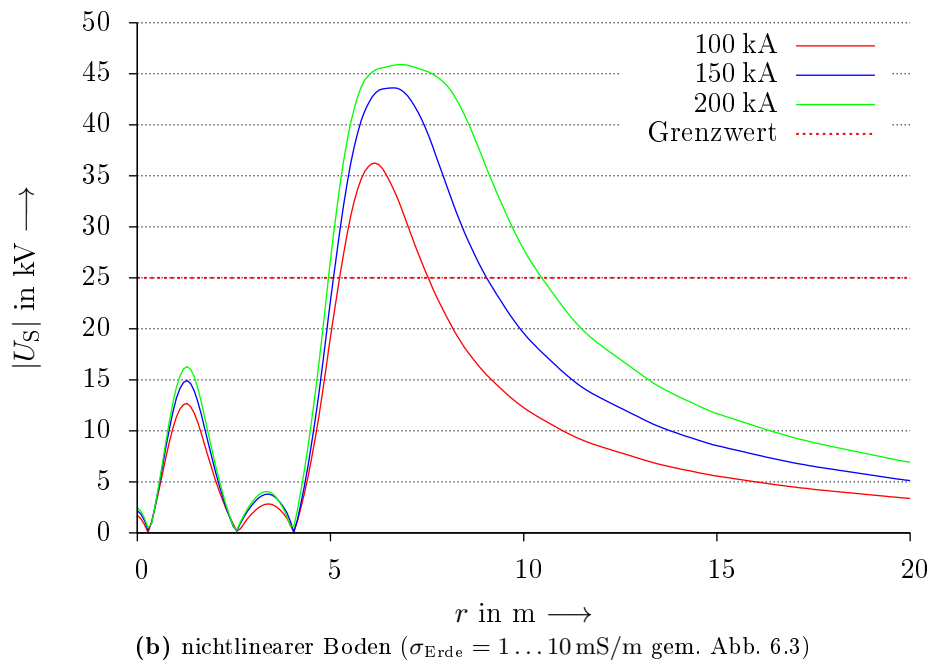
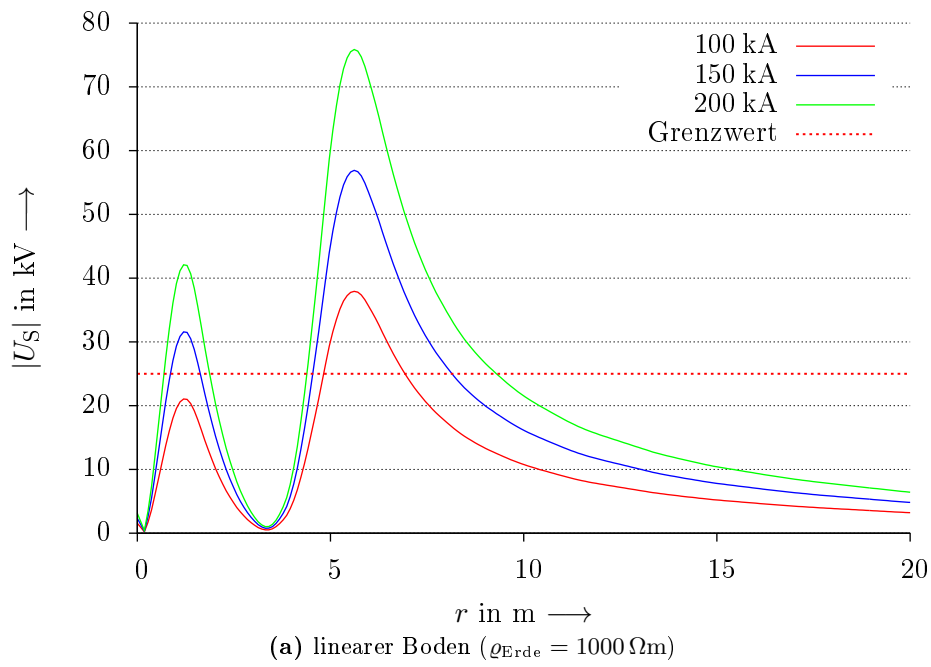


(a) linearer Boden ( $\rho_{\text{Erde}} = 1000 \Omega\text{m}$ )



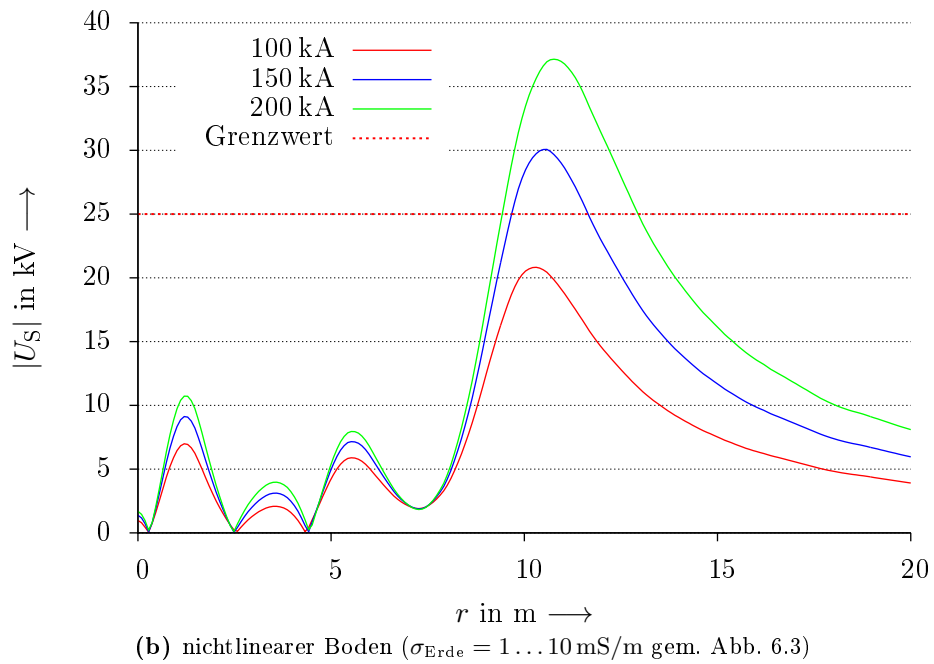
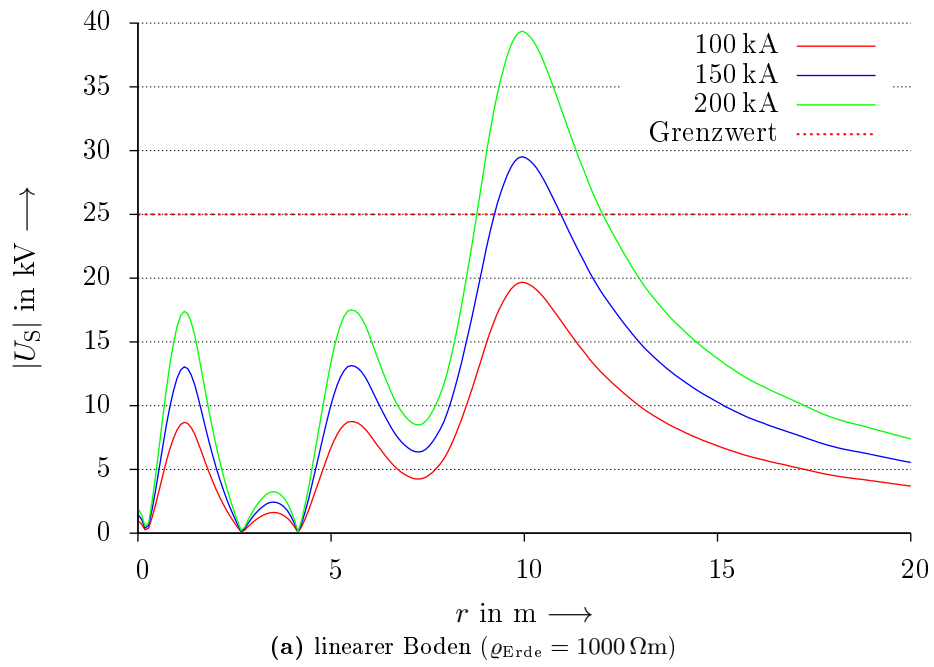
(b) nichtlinearer Boden ( $\sigma_{\text{Erde}} = 1 \dots 10 \text{ mS/m}$  gem. Abb. 6.3)

**Abbildung B.19.:** Schrittspannungen bei Verwendung eines Ringerders um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$

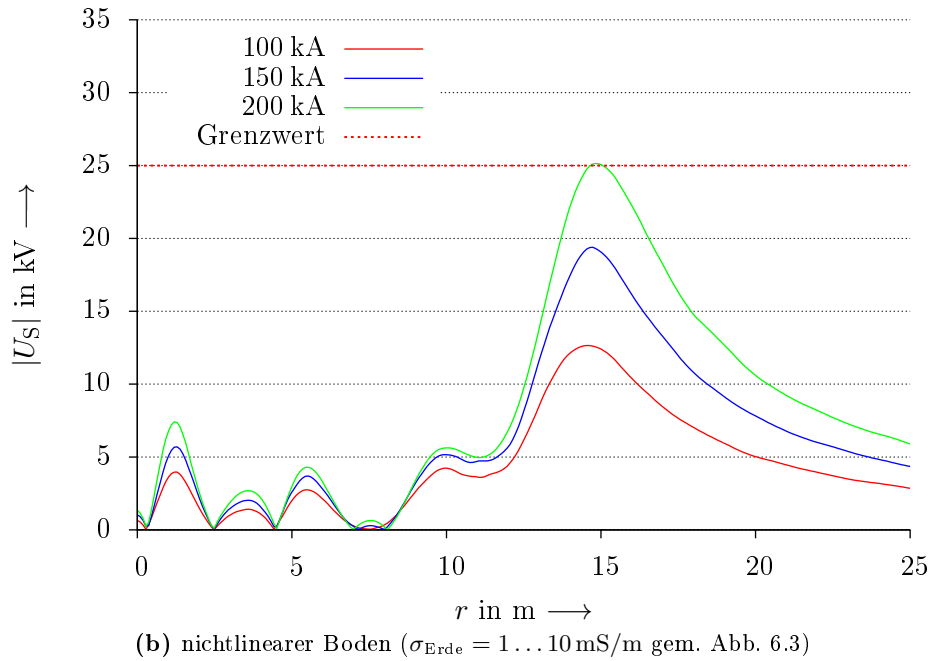
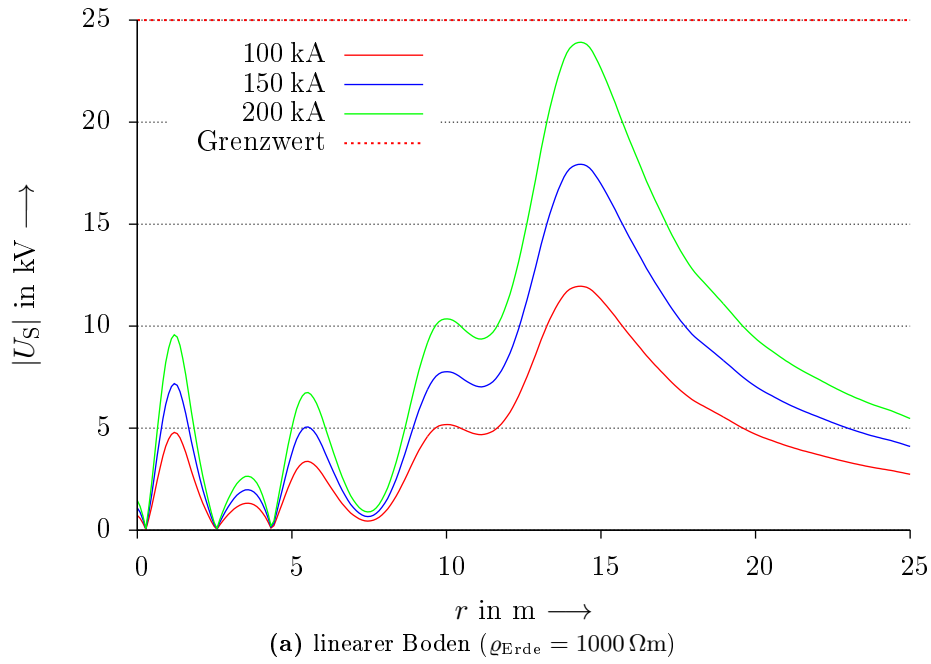


**Abbildung B.20.:** Schrittspannungen bei Verwendung von zwei Ringerdern um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen

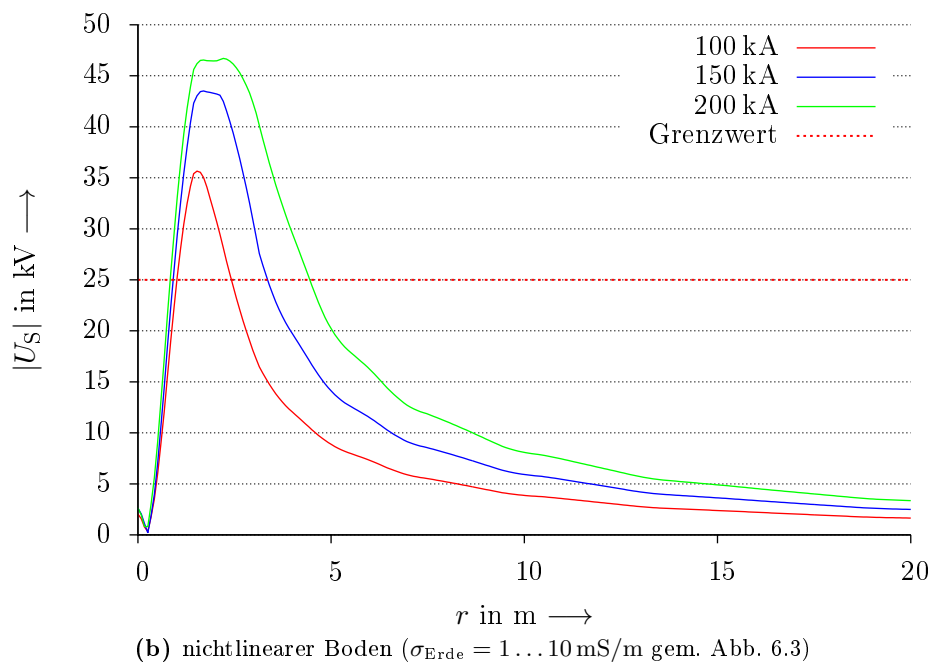
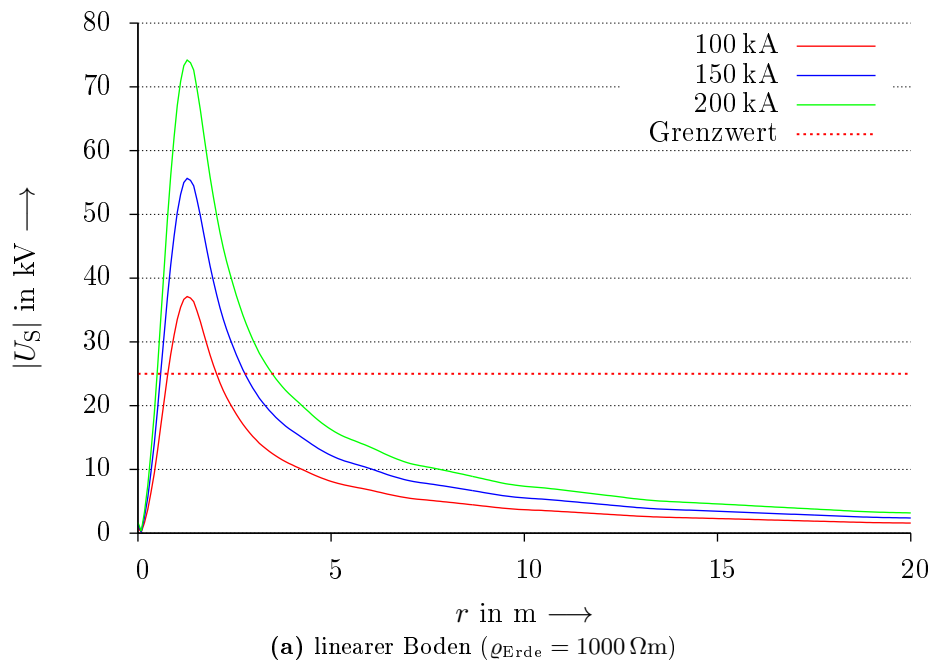


**Abbildung B.21.:** Schrittspannungen bei Verwendung von drei Ringerdern um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$

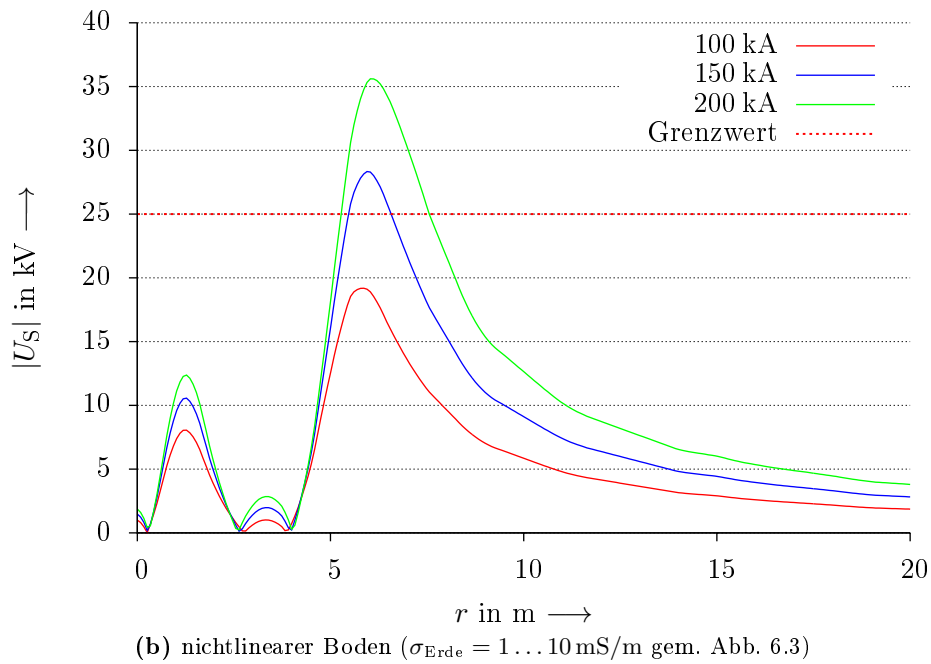
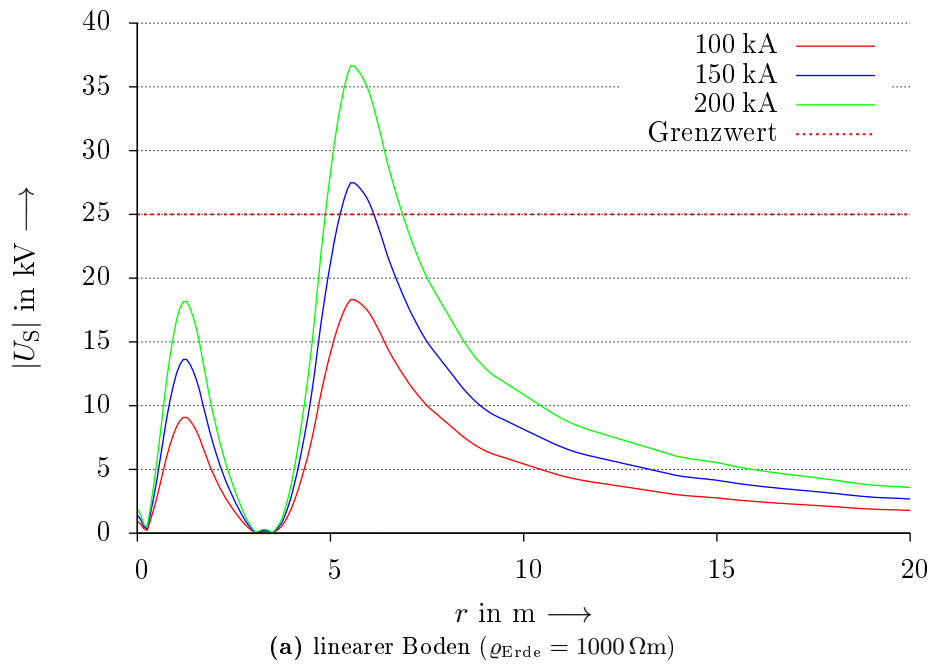


**Abbildung B.22.:** Schrittspannungen bei Verwendung von vier Ringerdern um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen

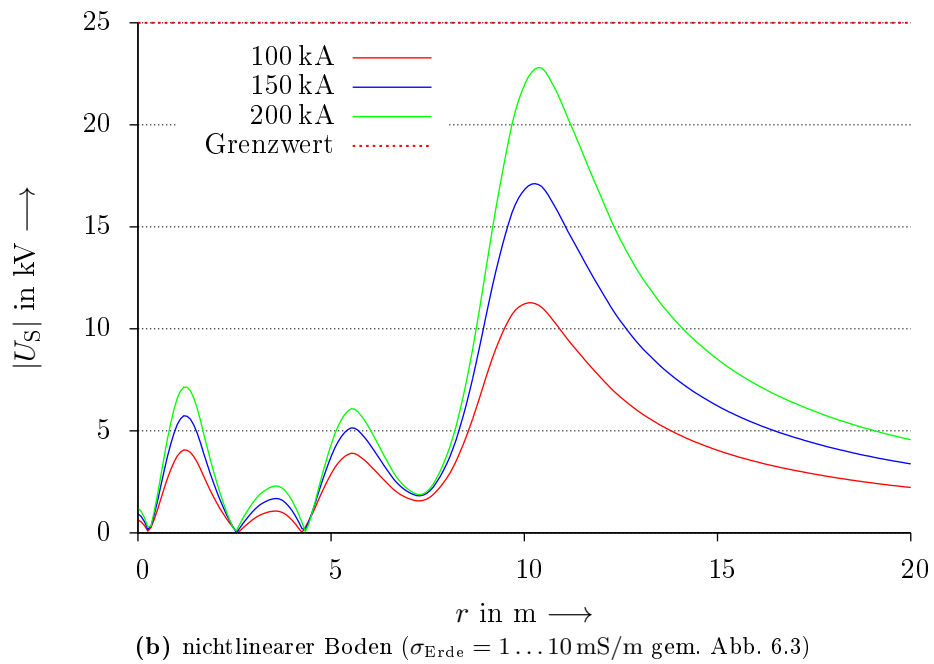
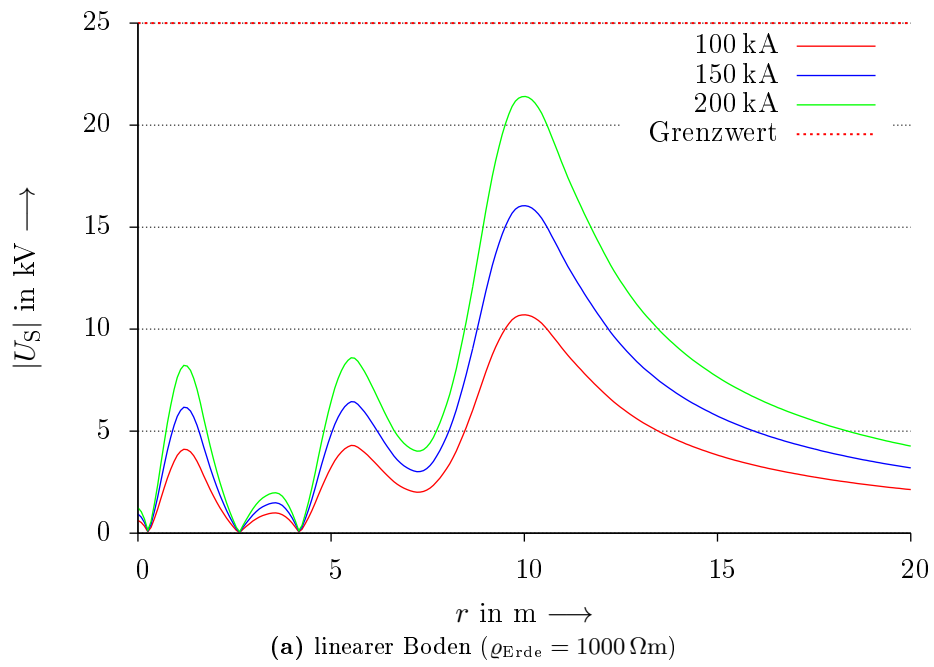


**Abbildung B.23.:** Schrittspannungen bei Verwendung eines Ringerders um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m}$



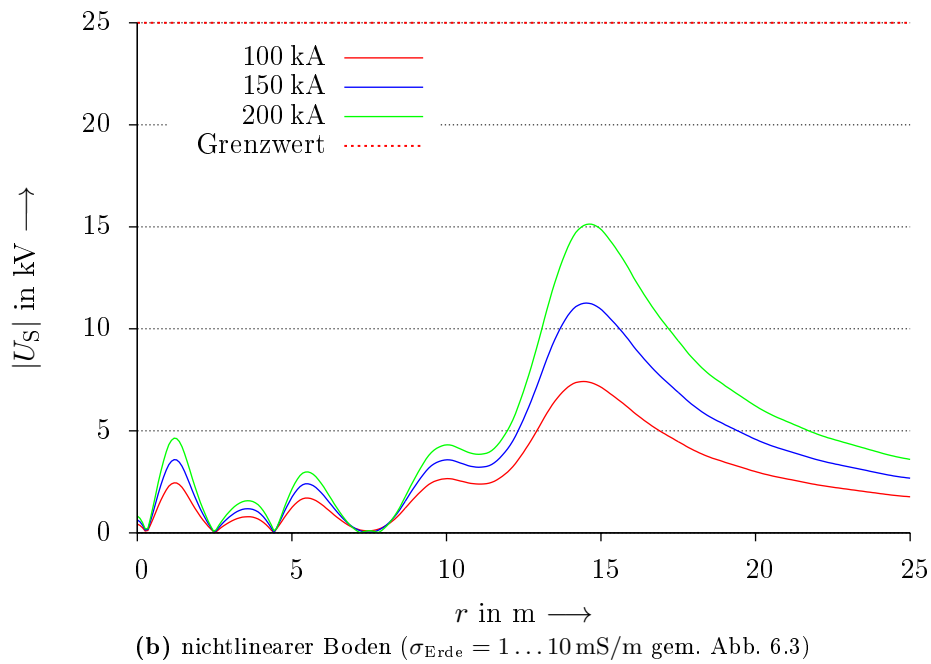
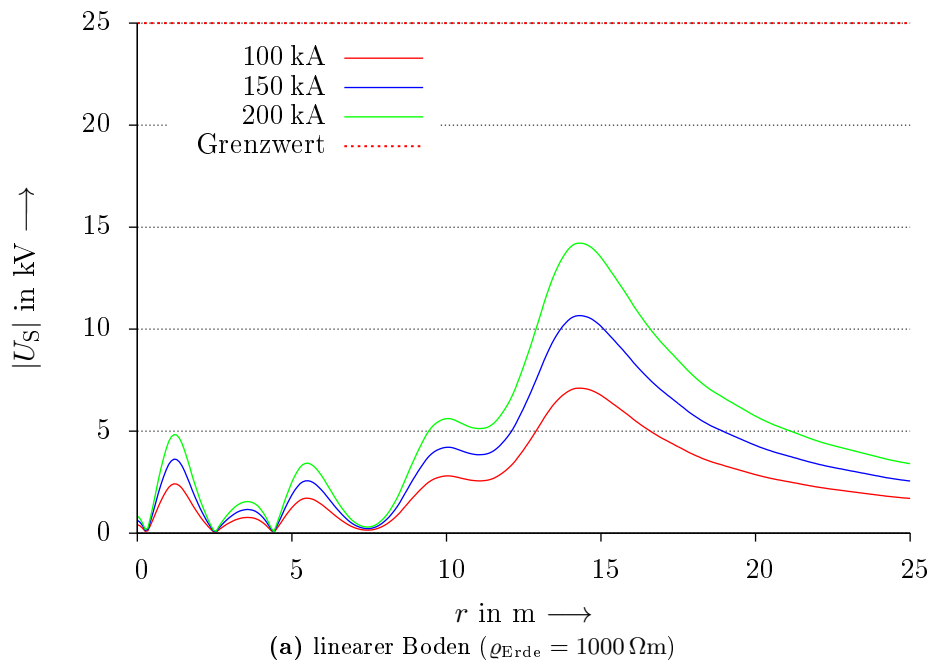
**Abbildung B.24.:** Schrittspannungen bei Verwendung von zwei Ringerdern um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen



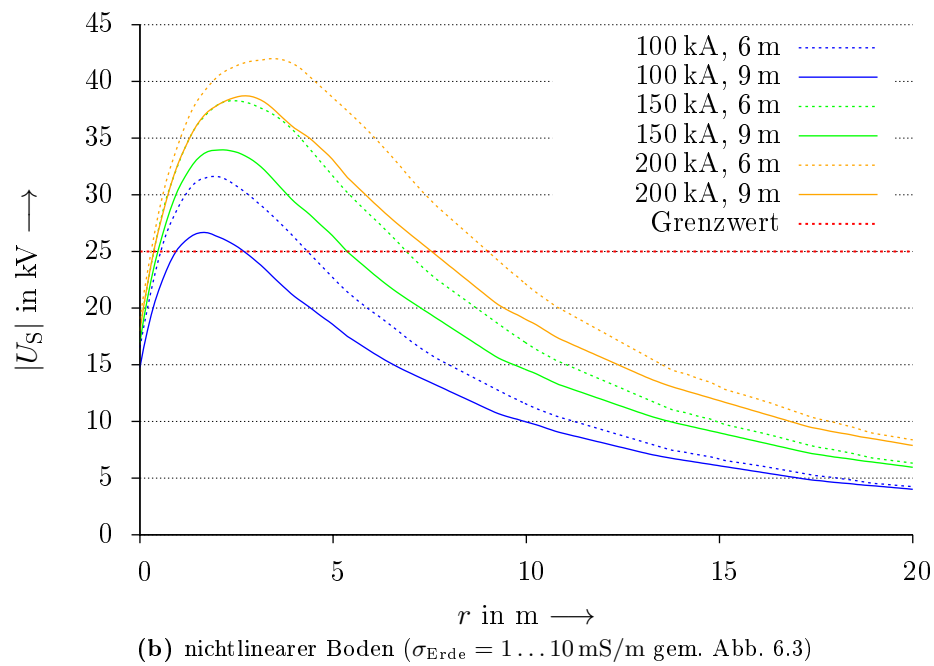
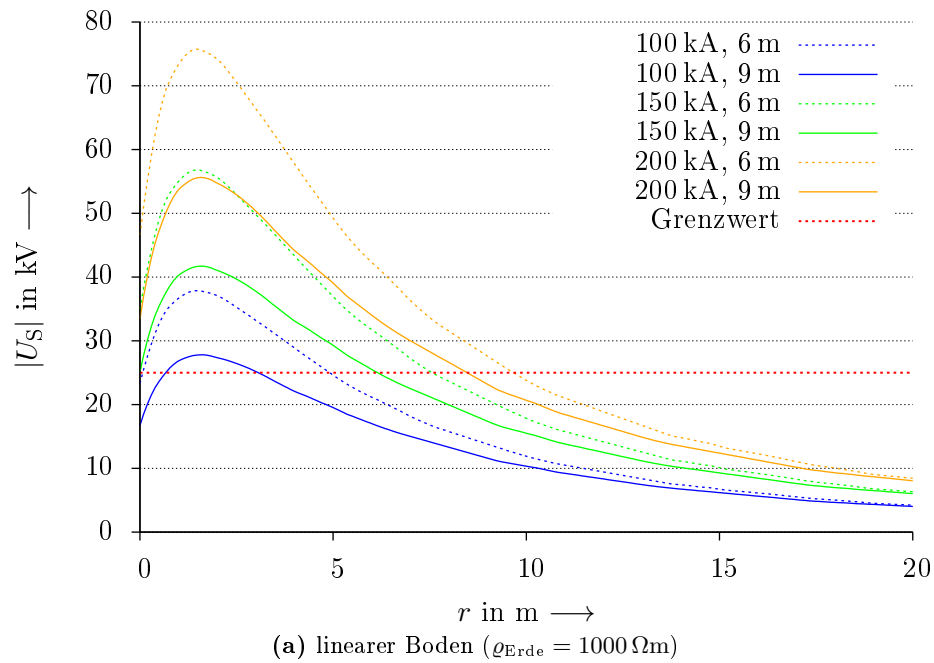
**Abbildung B.25.:** Schrittspannungen bei Verwendung von drei Ringerdern um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m}$



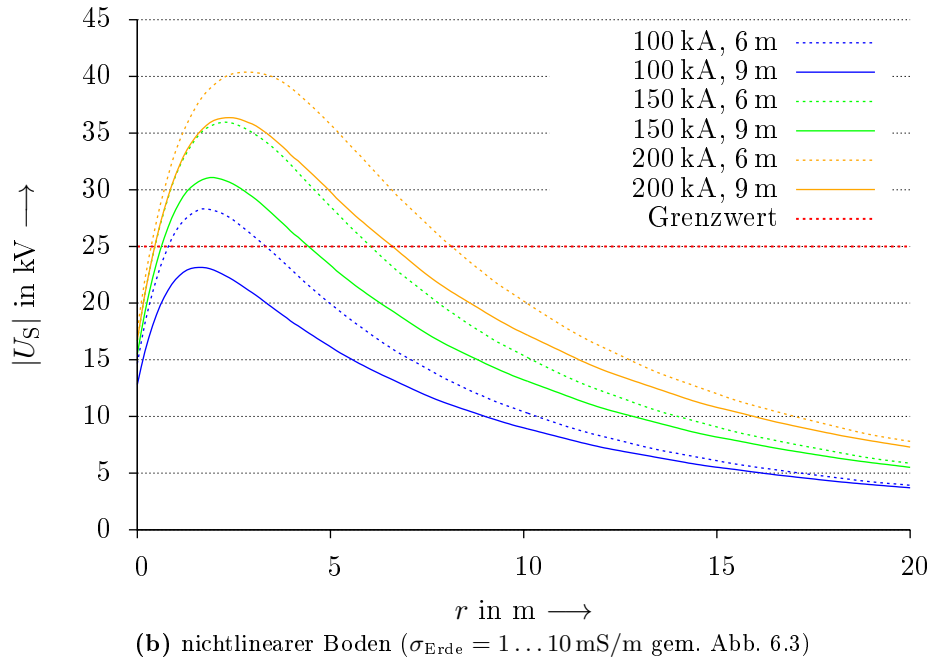
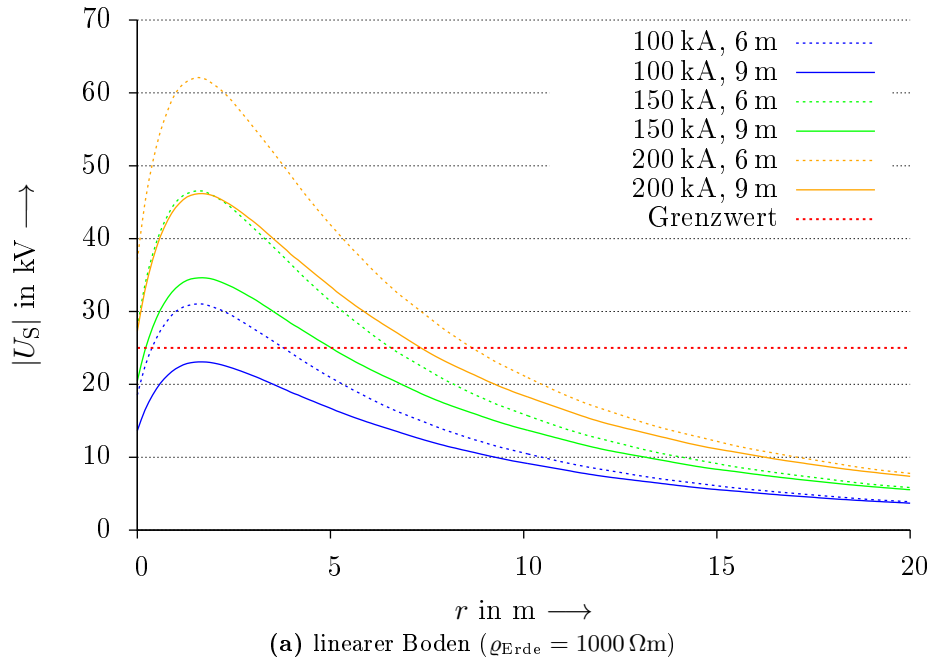


**Abbildung B.26.:** Schrittspannungen bei Verwendung von vier Ringerdern um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen

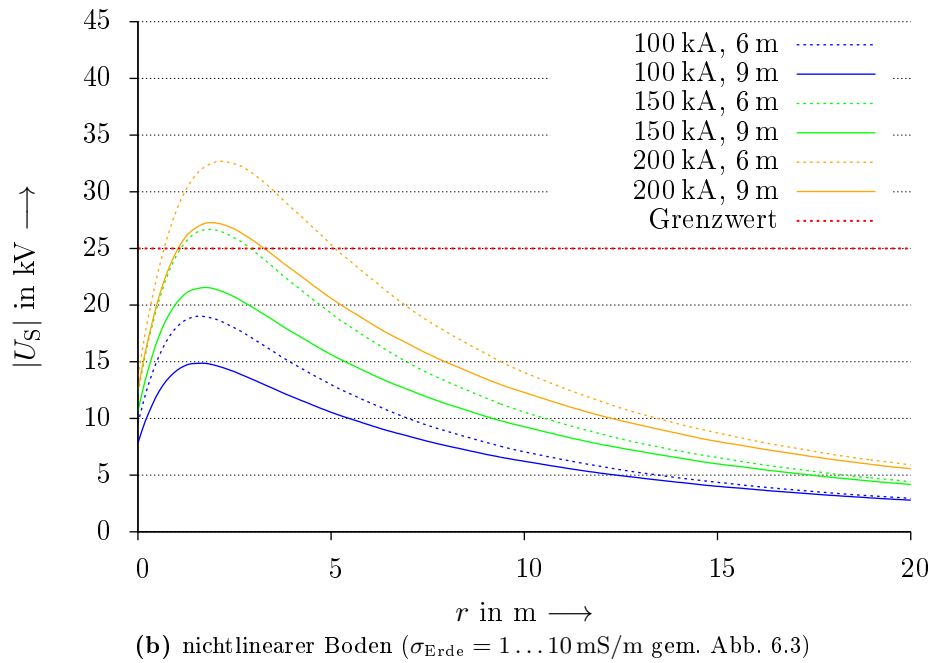
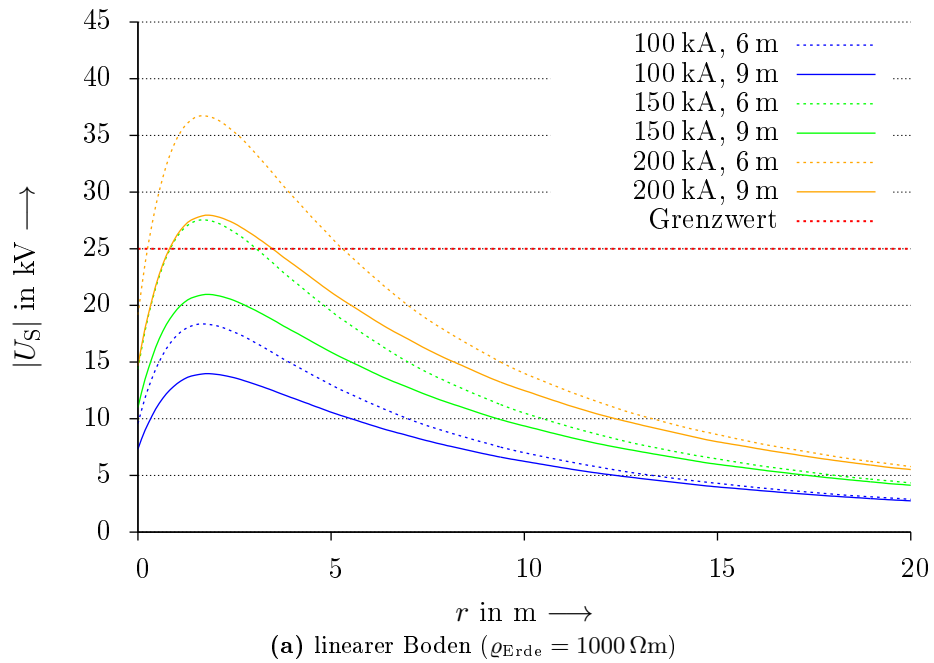


**Abbildung B.27.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Tieferdern unterschiedlicher Länge, im Keller beginnend, um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$

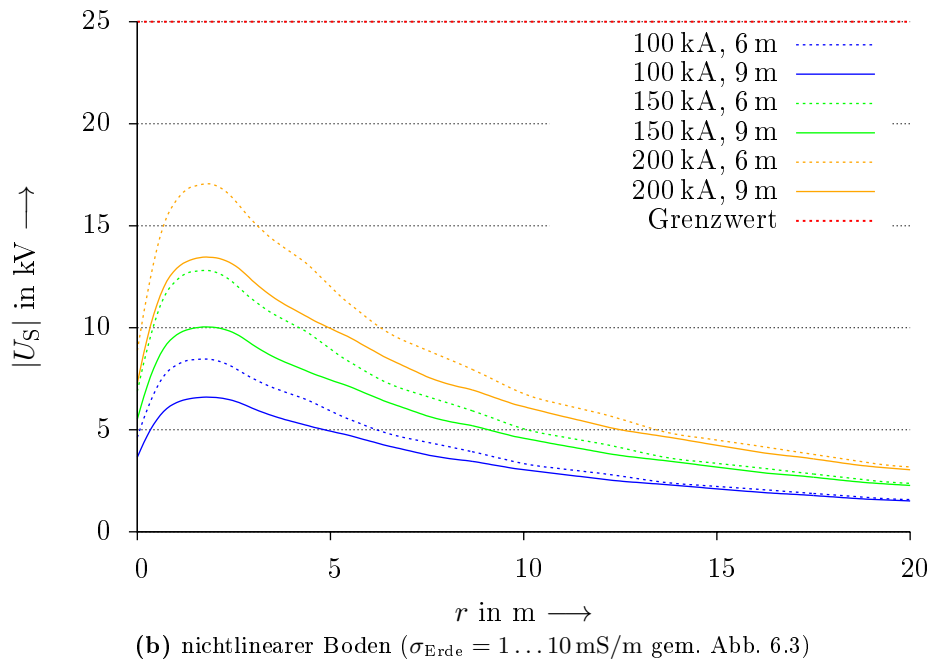
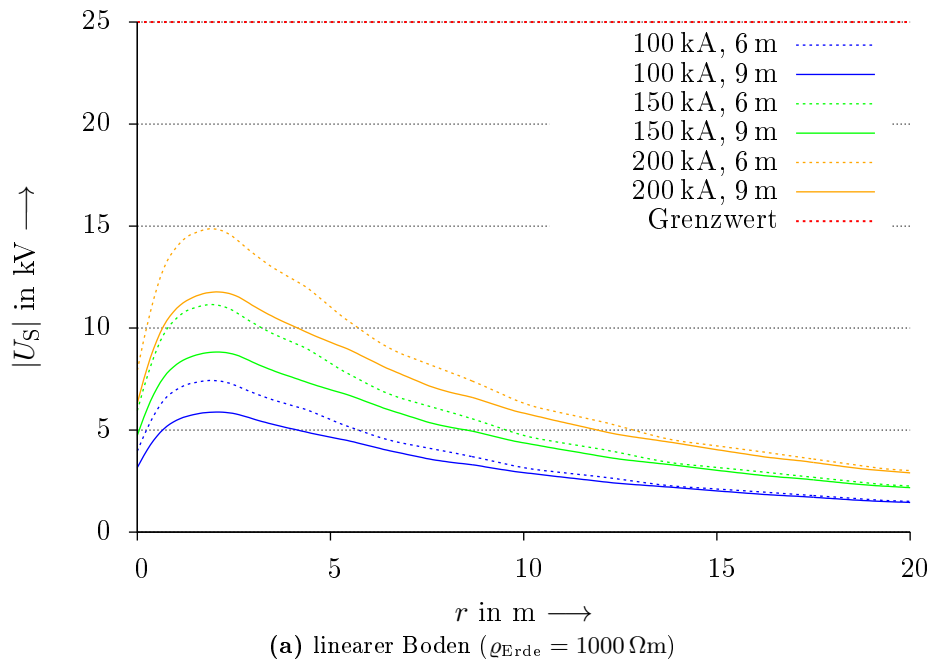


**Abbildung B.28.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Tiefenerdern unterschiedlicher Länge, im Keller beginnend, um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen

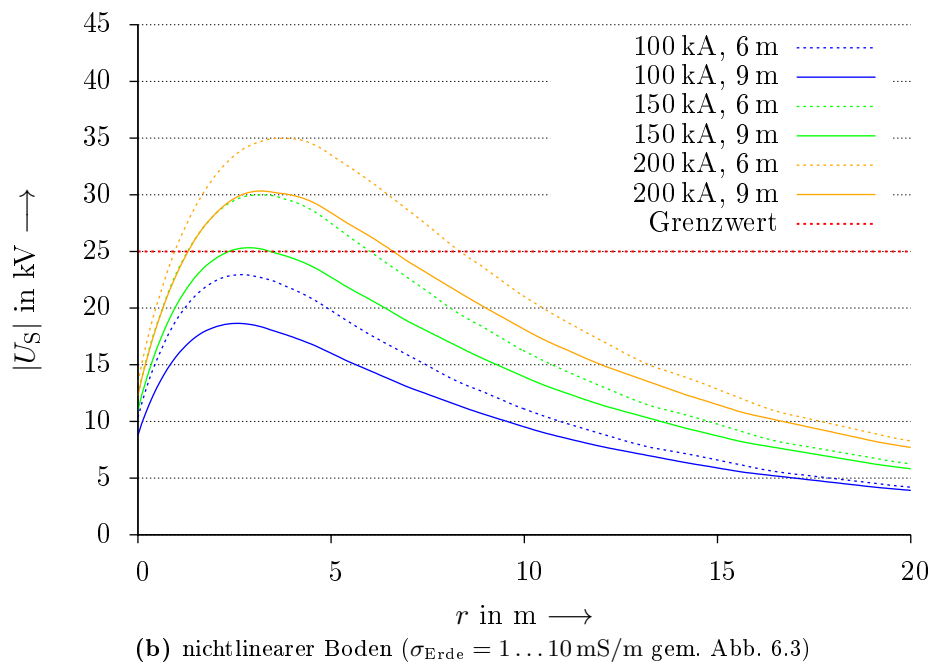
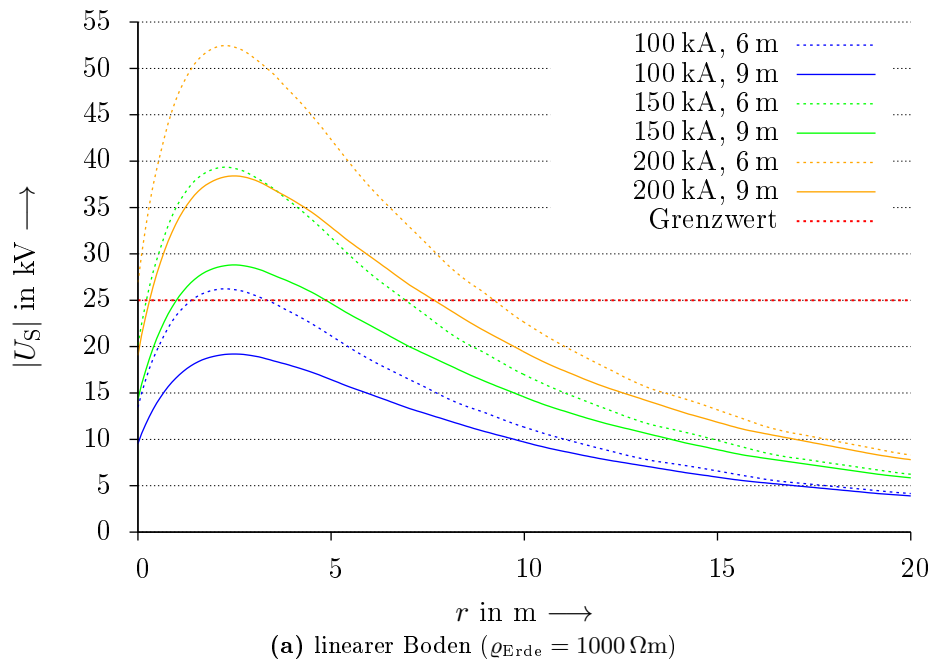


**Abbildung B.29.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Tieferdern unterschiedlicher Länge, im Keller beginnend, um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$

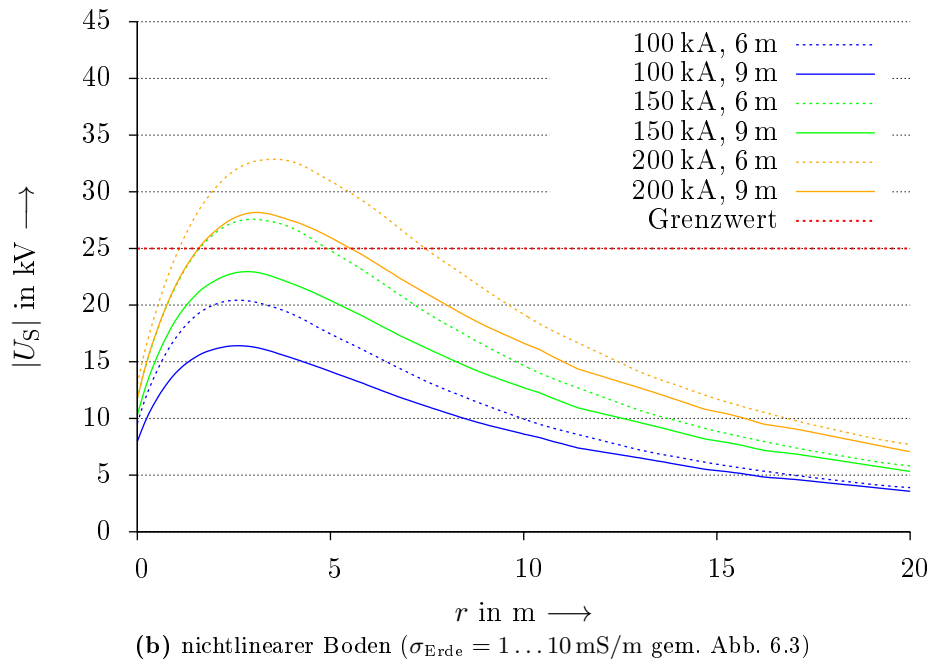
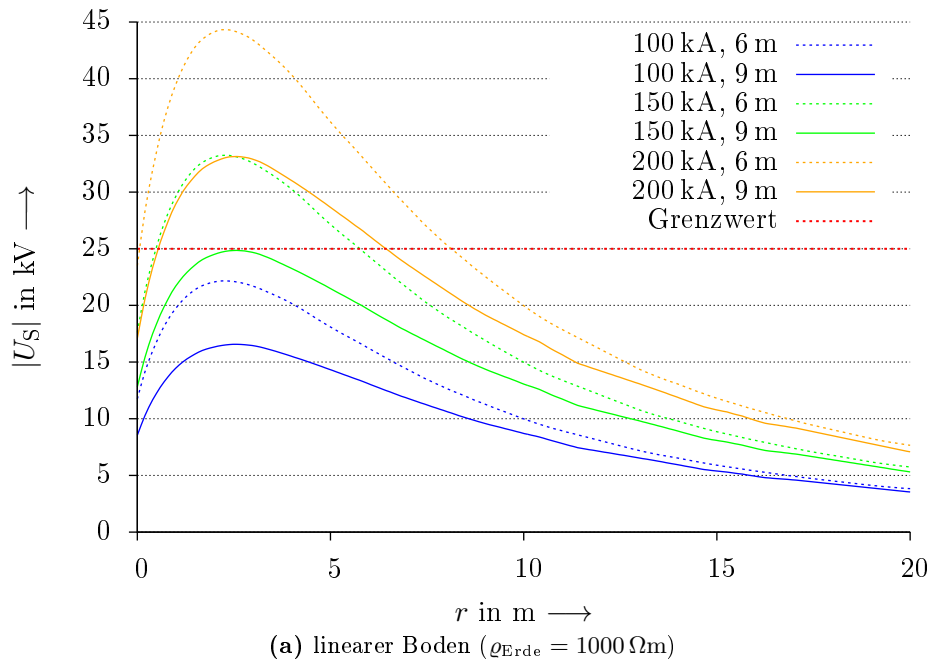


**Abbildung B.30.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Tiefenerdern unterschiedlicher Länge, im Keller beginnend, um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen

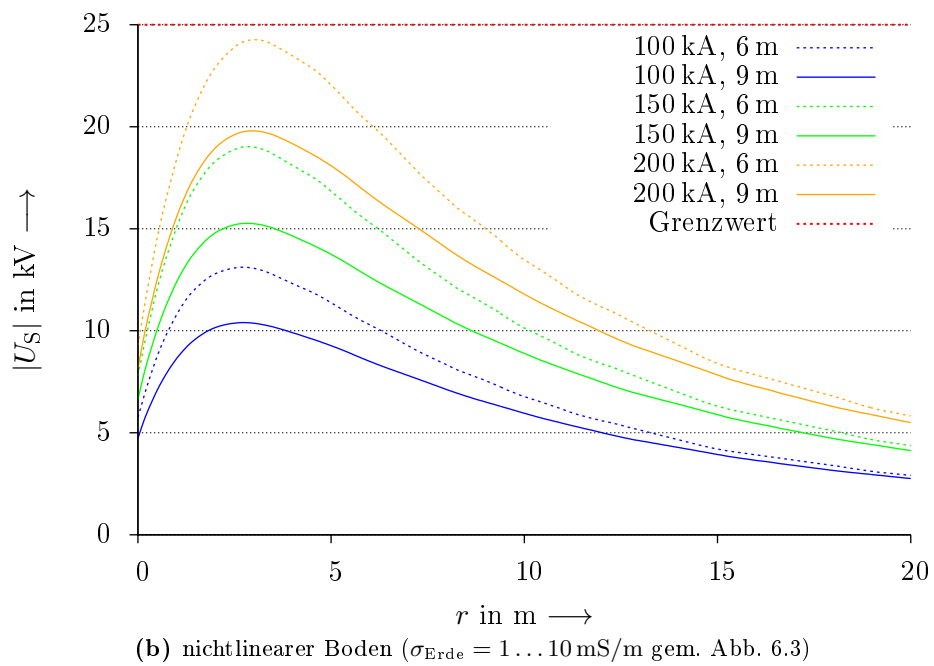
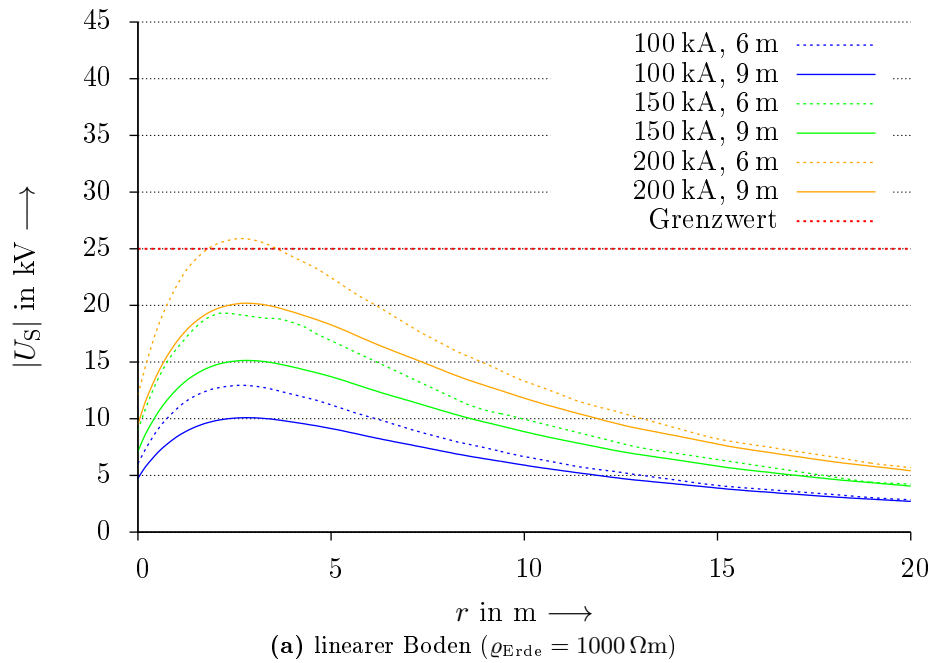


**Abbildung B.31.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Tieferdern unterschiedlicher Länge, im Keller beginnend und oberste 1,5 m Länge isoliert, um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$



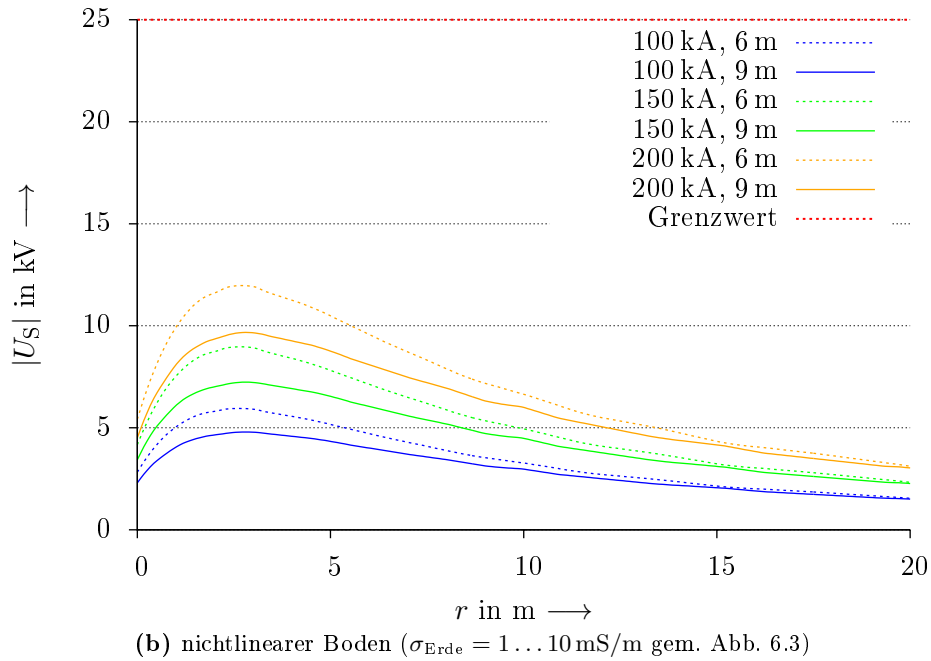
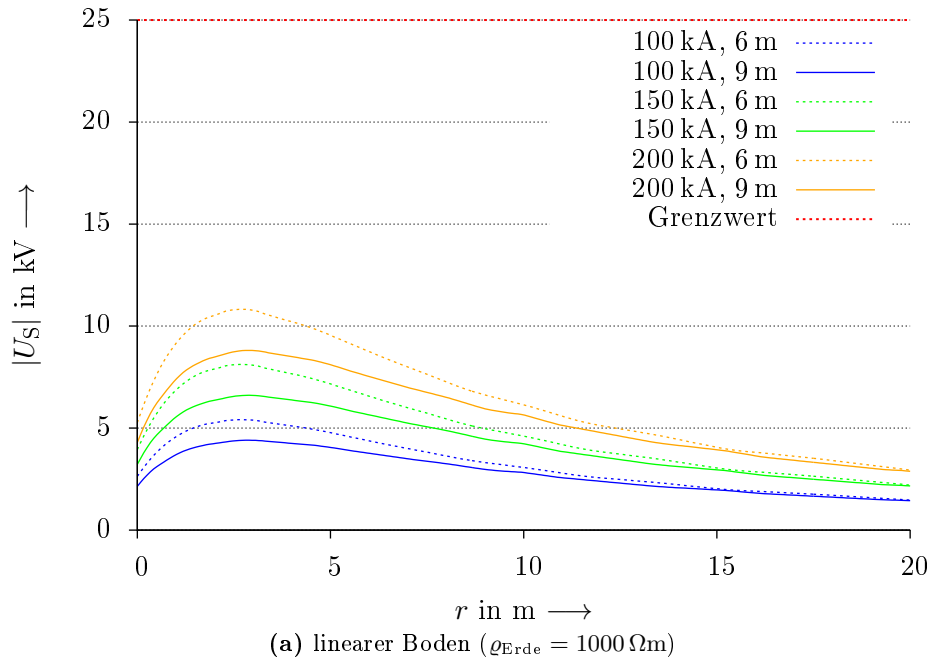
**Abbildung B.32.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Tiefenerdern unterschiedlicher Länge, im Keller beginnend und oberste 1,5 m Länge isoliert, um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen



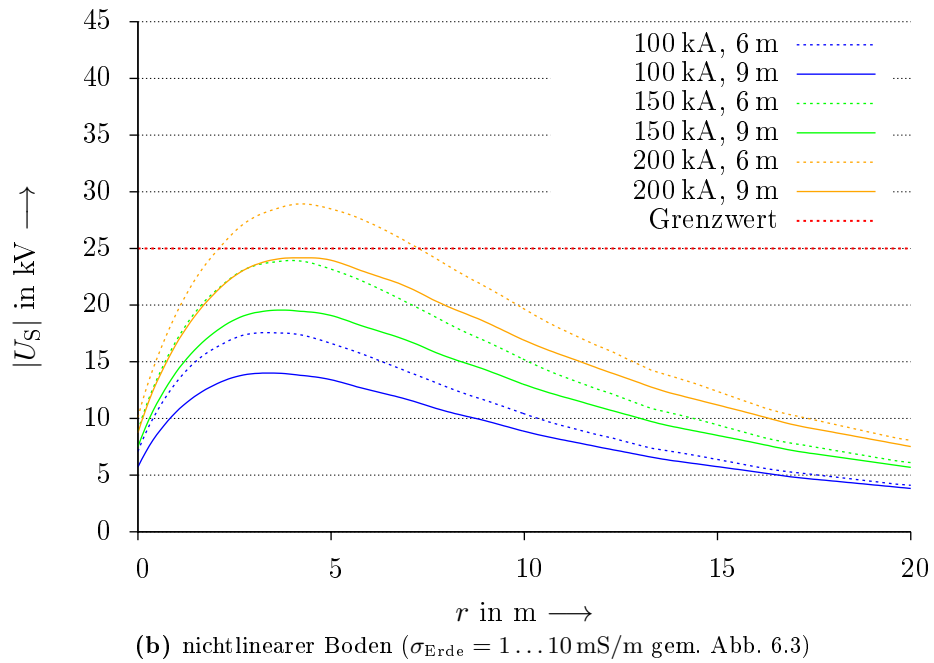
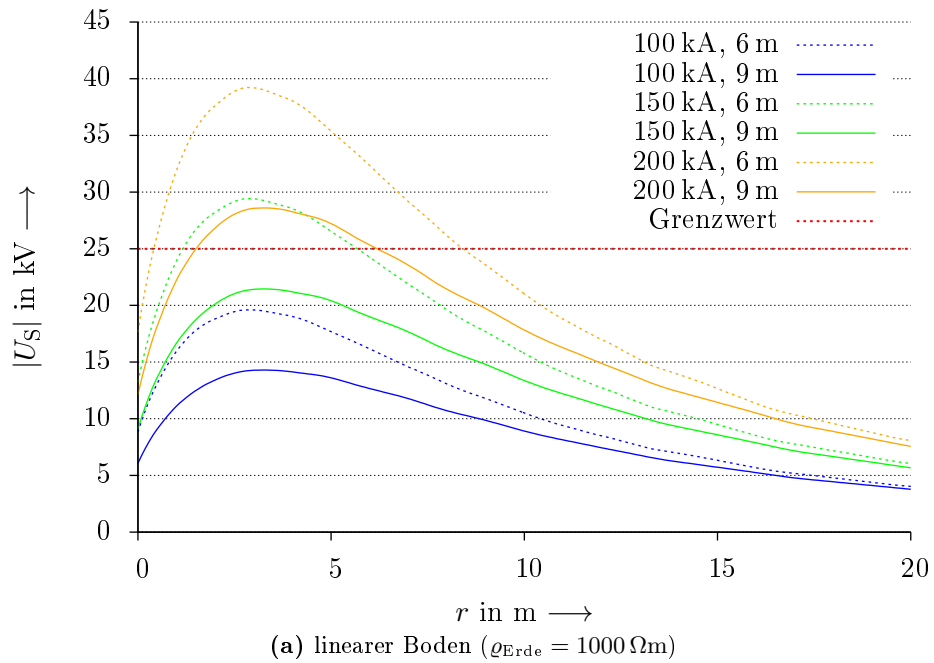
**Abbildung B.33.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Tiefenerdern unterschiedlicher Länge, im Keller beginnend und oberste 1,5 m Länge isoliert, um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$



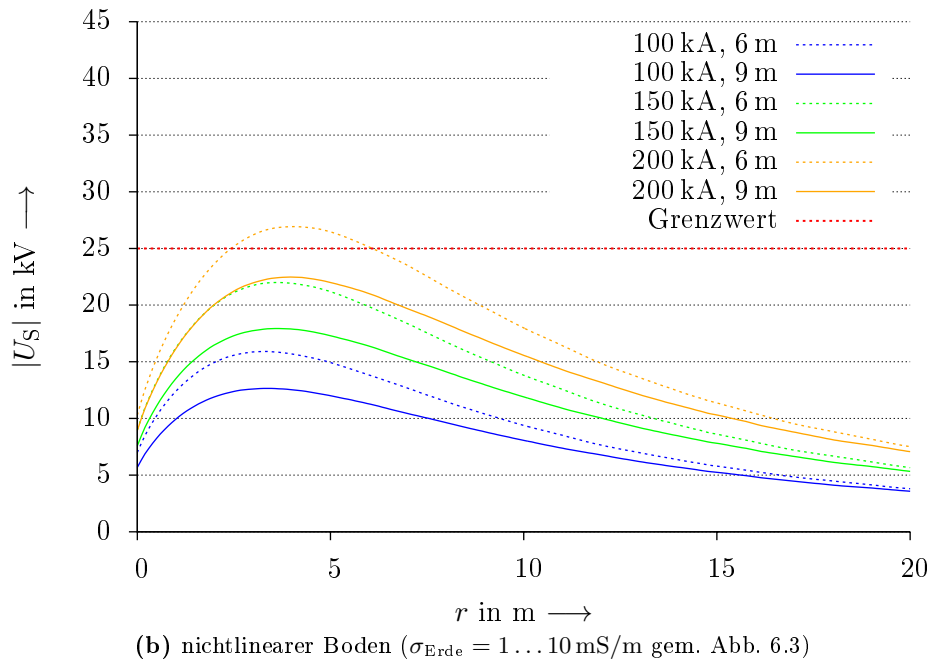
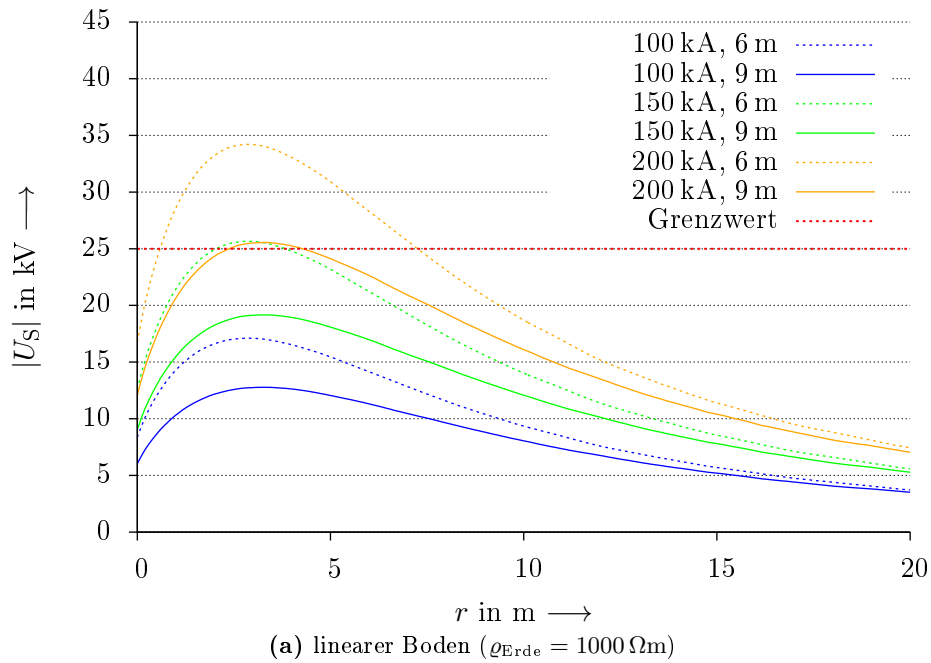


**Abbildung B.34.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Tiefenerdern unterschiedlicher Länge, im Keller beginnend und oberste 1,5 m Länge isoliert, um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen

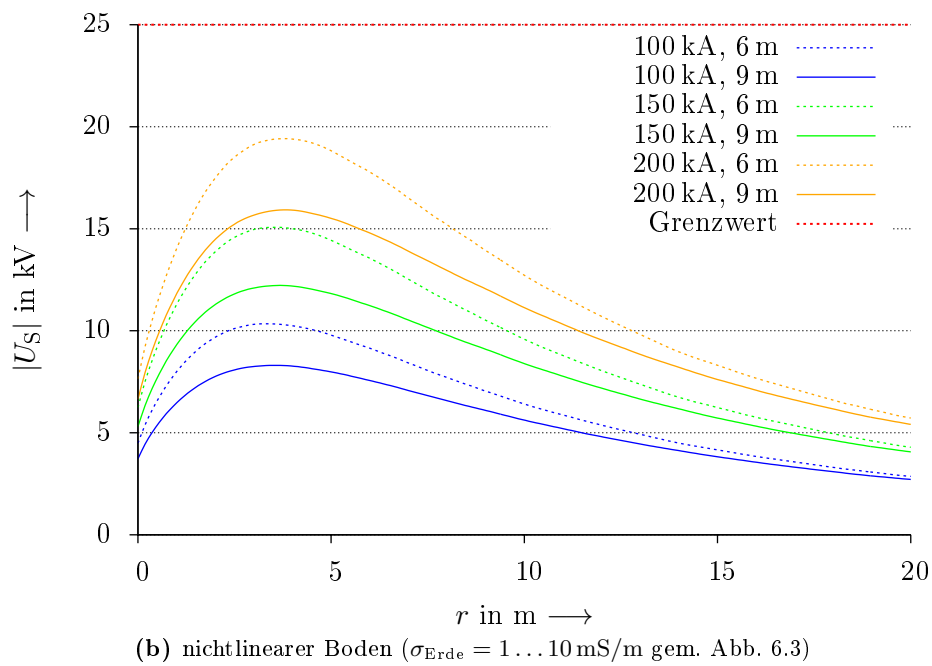
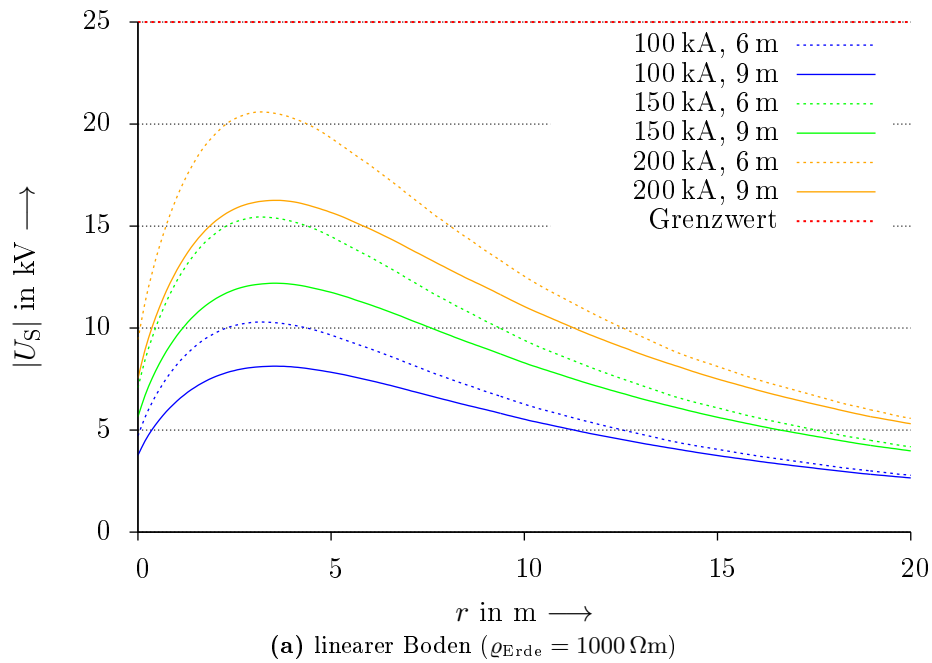


**Abbildung B.35.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Tiefenerdern unterschiedlicher Länge, im Keller beginnend und oberste 3 m Länge isoliert, um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$

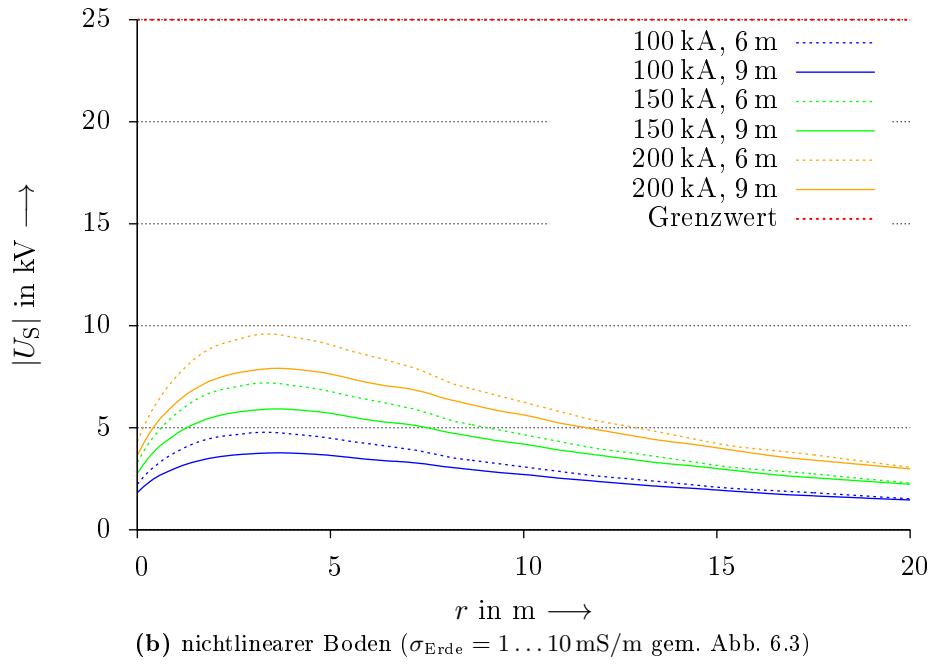
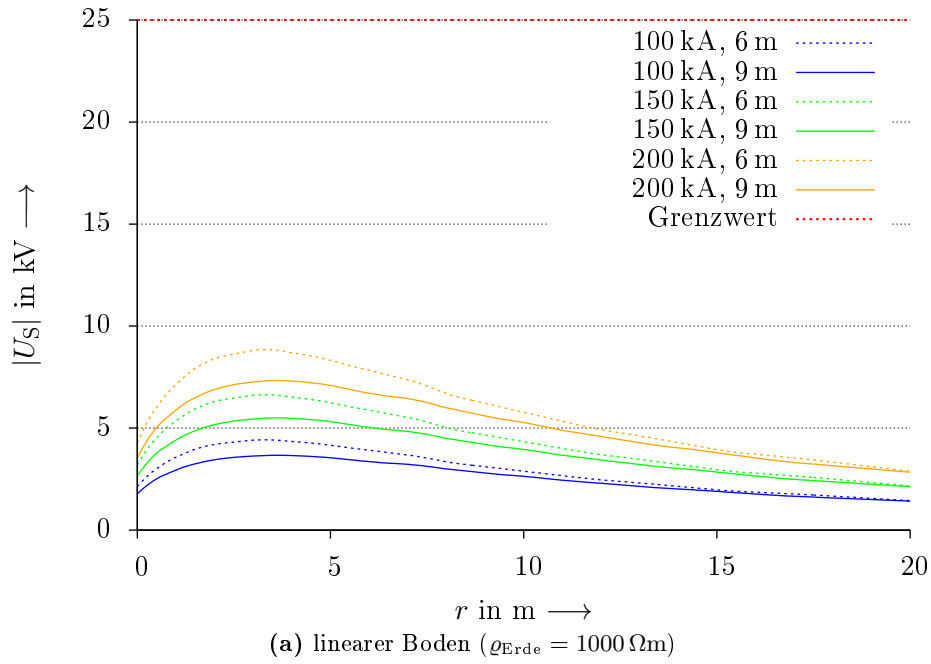


**Abbildung B.36.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Tiefenerdern unterschiedlicher Länge, im Keller beginnend und oberste 3 m Länge isoliert, um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen

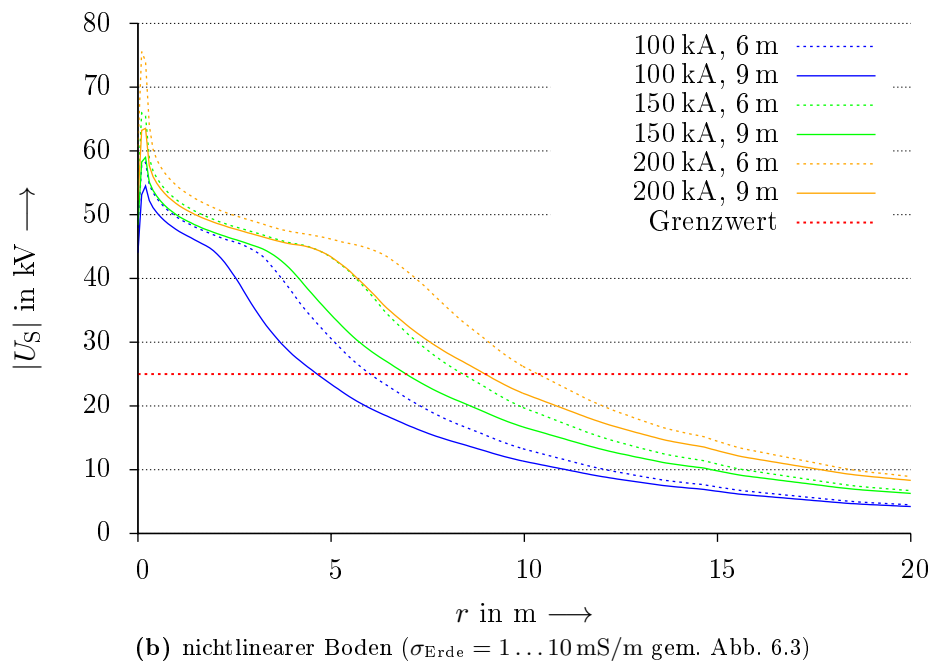
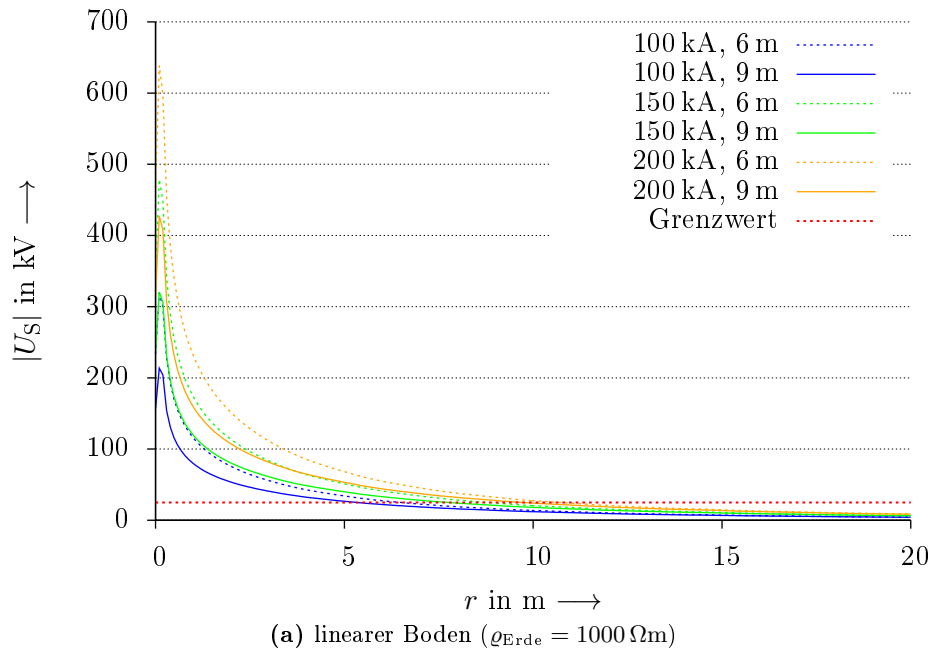


**Abbildung B.37.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Tiefenerdern unterschiedlicher Länge, im Keller beginnend und oberste 3 m Länge isoliert, um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$

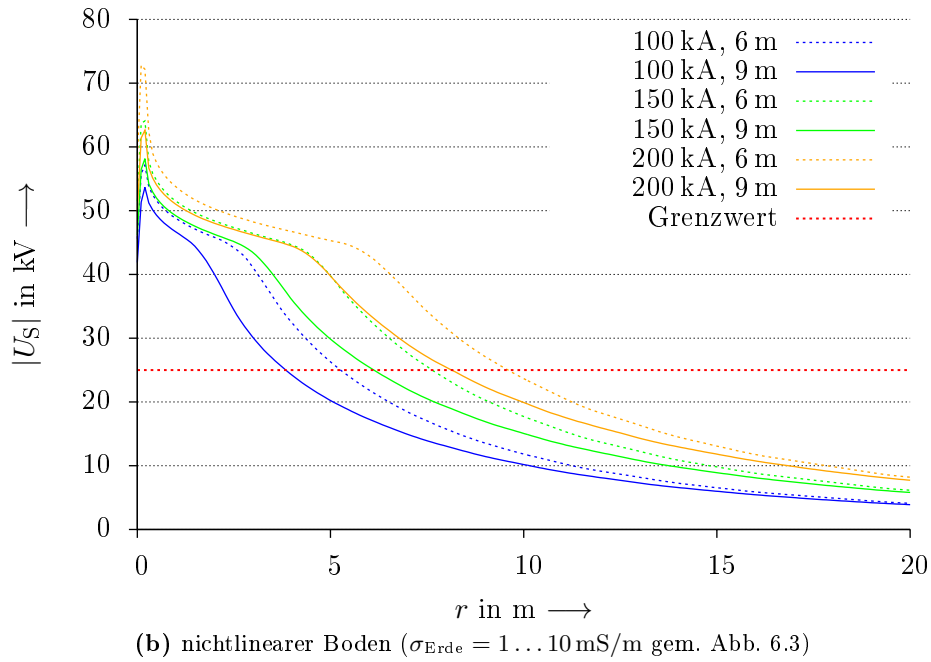
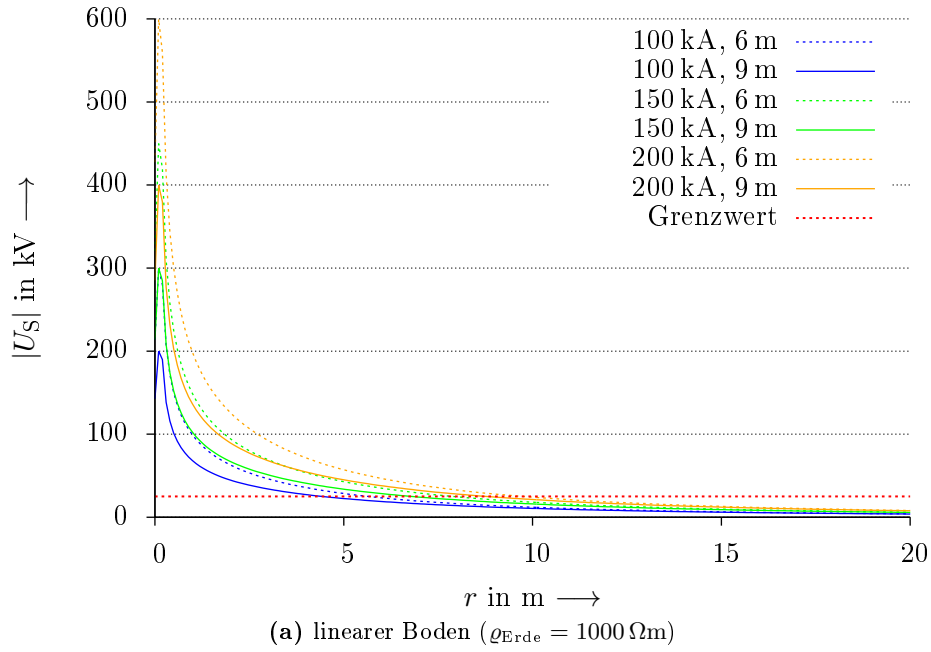


**Abbildung B.38.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Tiefenerdern unterschiedlicher Länge, im Keller beginnend und oberste 3 m Länge isoliert, um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen

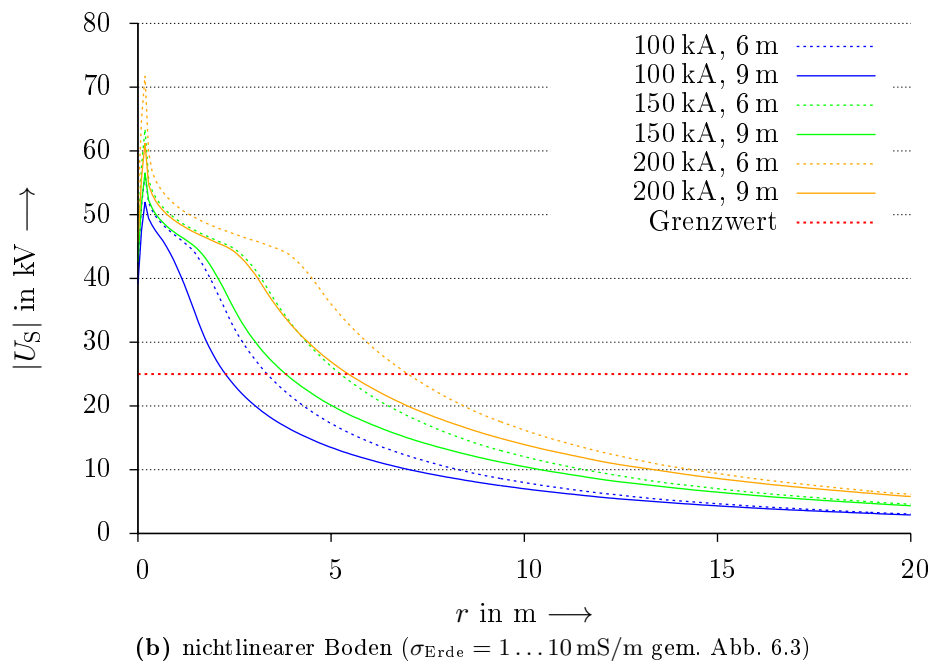
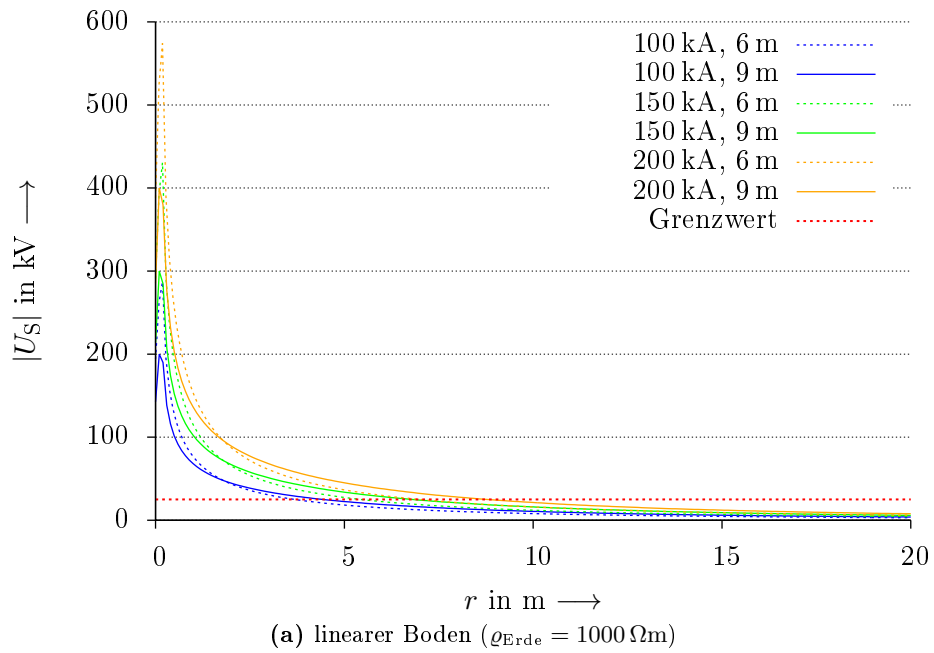


**Abbildung B.39.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Tiefenerdern unterschiedlicher Länge, auf der Erdoberfläche (ebenerdig) beginnend, um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$



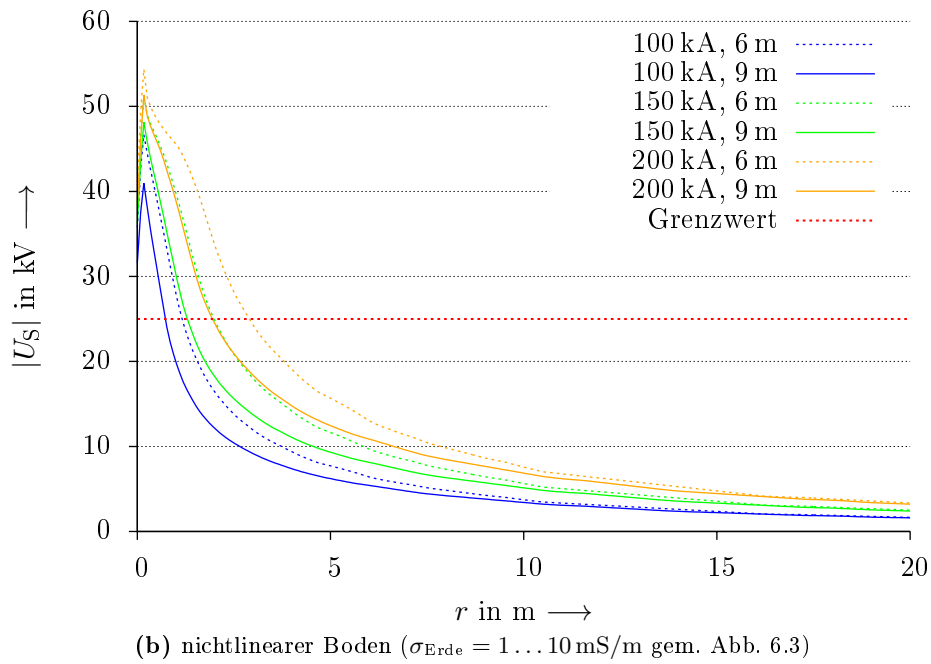
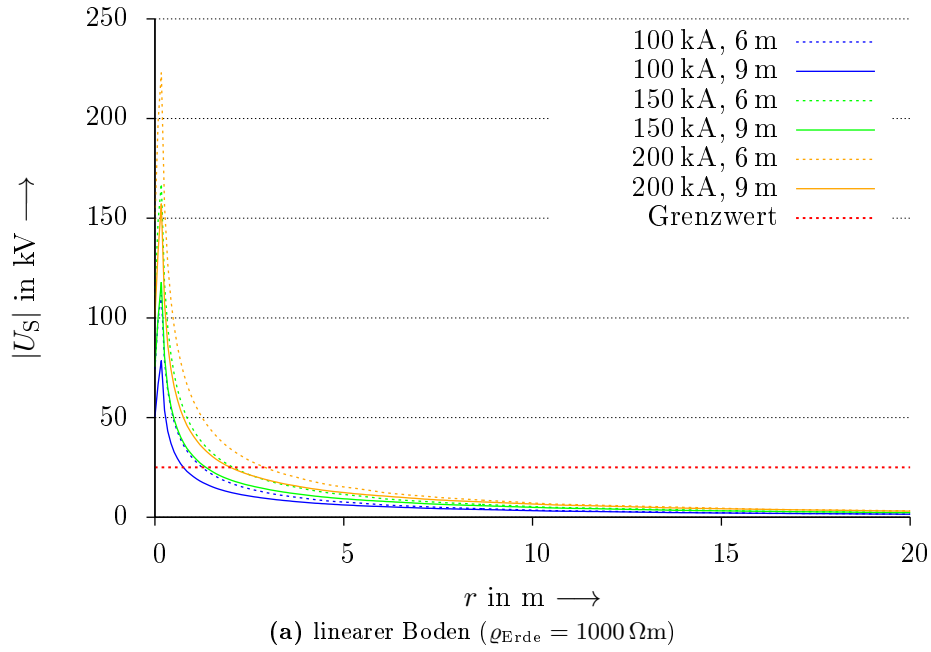
**Abbildung B.40.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Tiefenerdern unterschiedlicher Länge, auf der Erdoberfläche (ebenerdig) beginnend, um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen



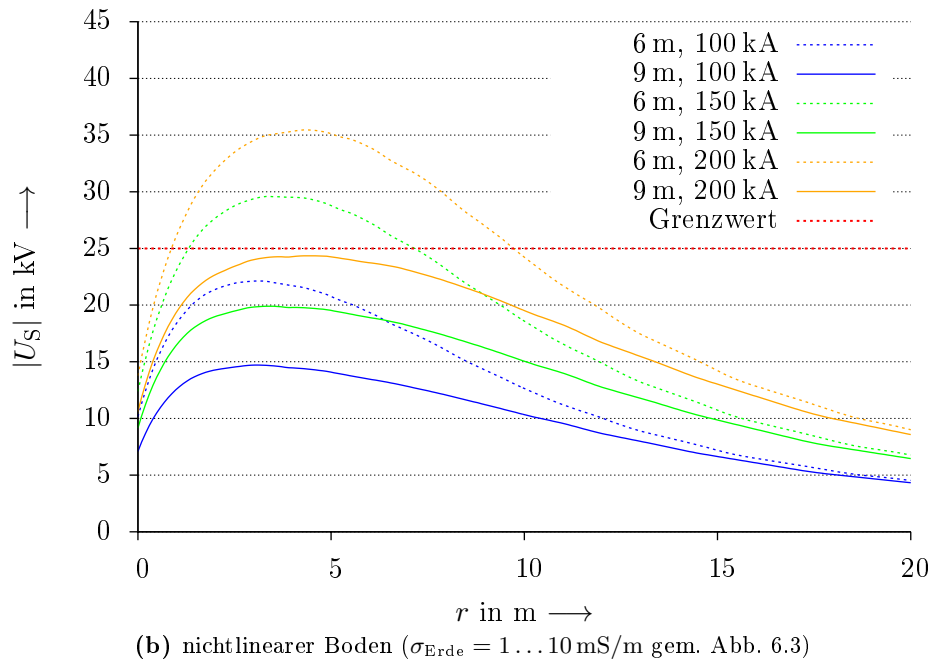
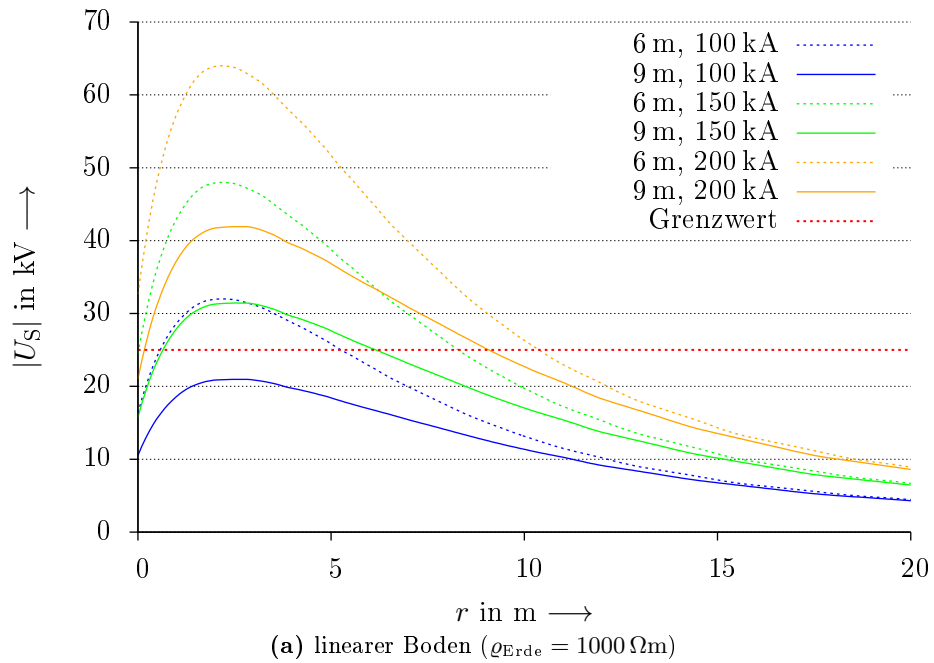
**Abbildung B.41.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Tiefenerdern unterschiedlicher Länge, auf der Erdoberfläche (ebenerdig) beginnend, um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$



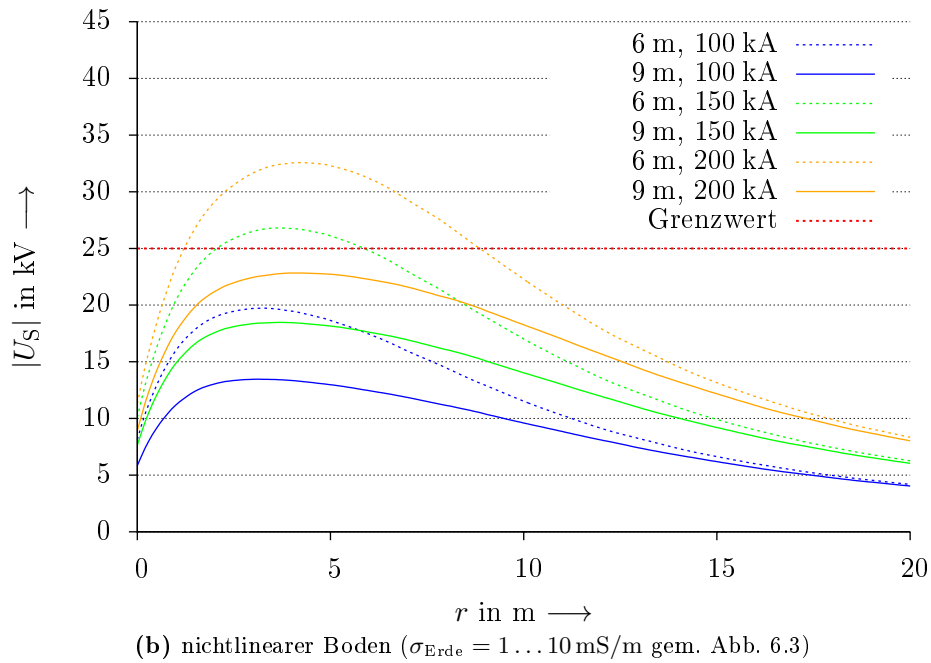
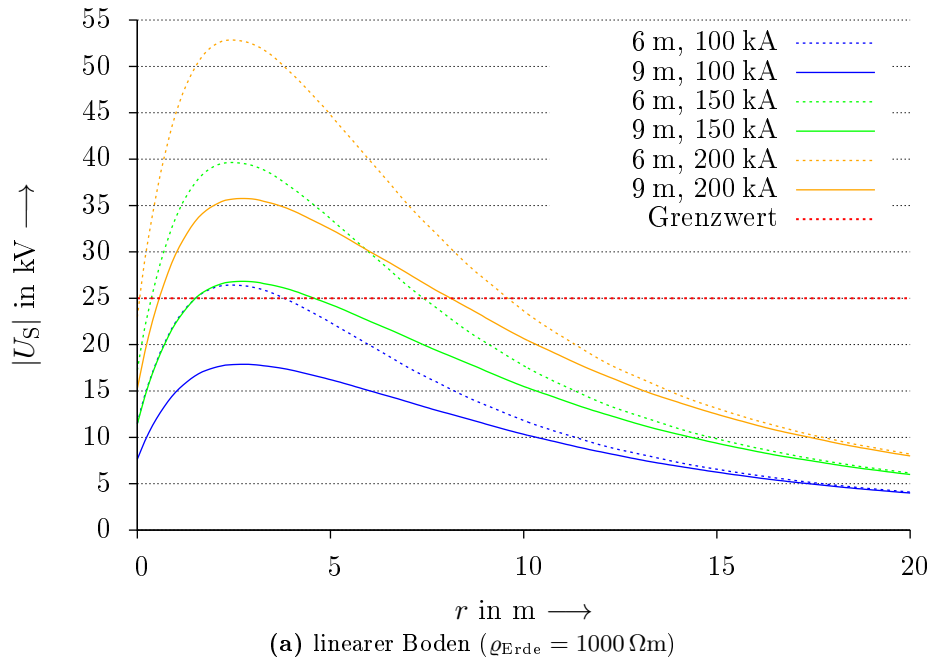


**Abbildung B.42.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Tiefenerdern unterschiedlicher Länge, auf der Erdoberfläche (ebenerdig) beginnend, um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen

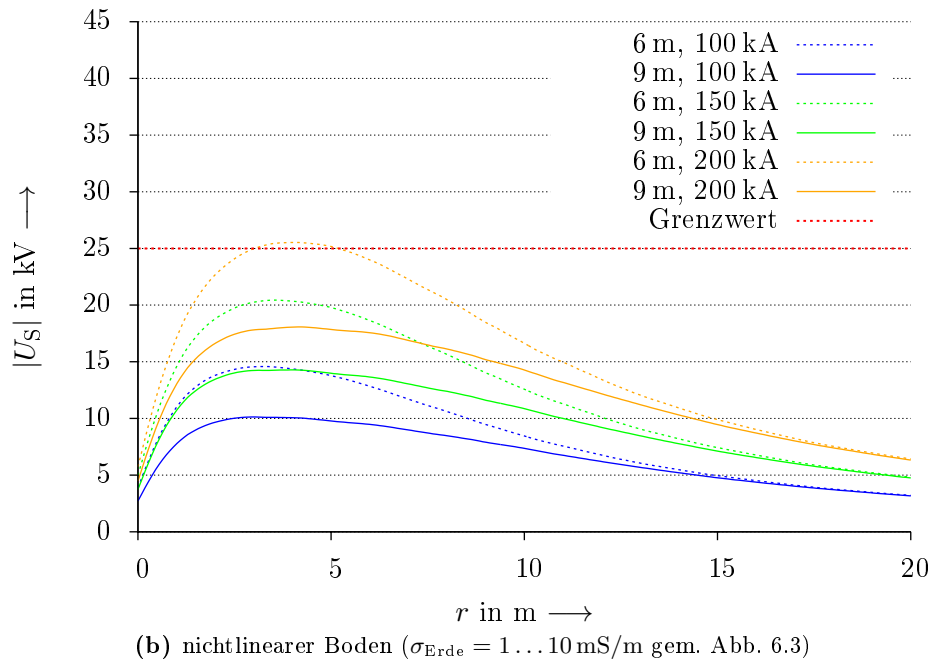
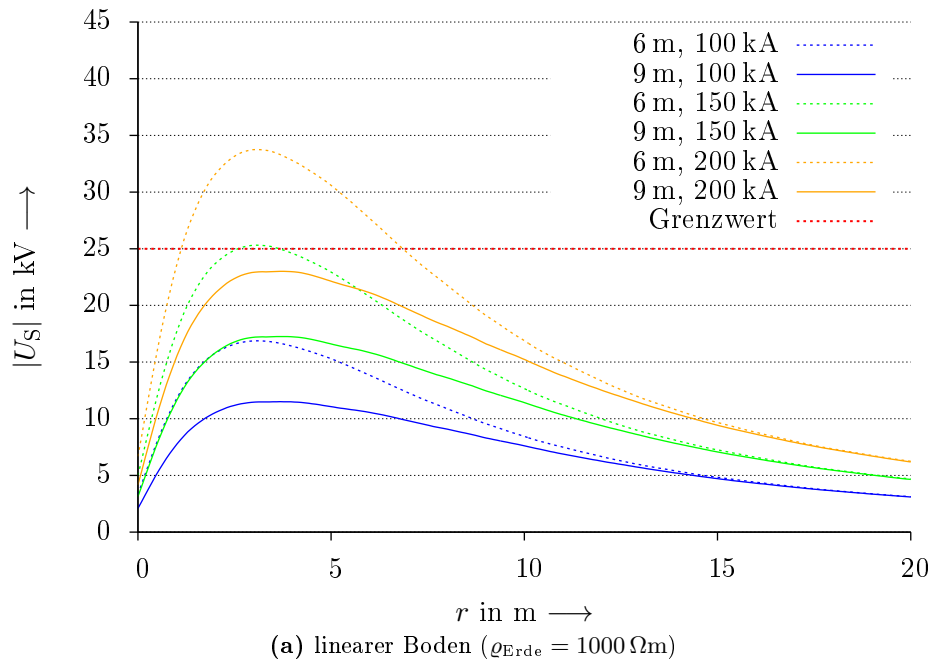


**Abbildung B.43.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Schrägerdern Typ 1 unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$

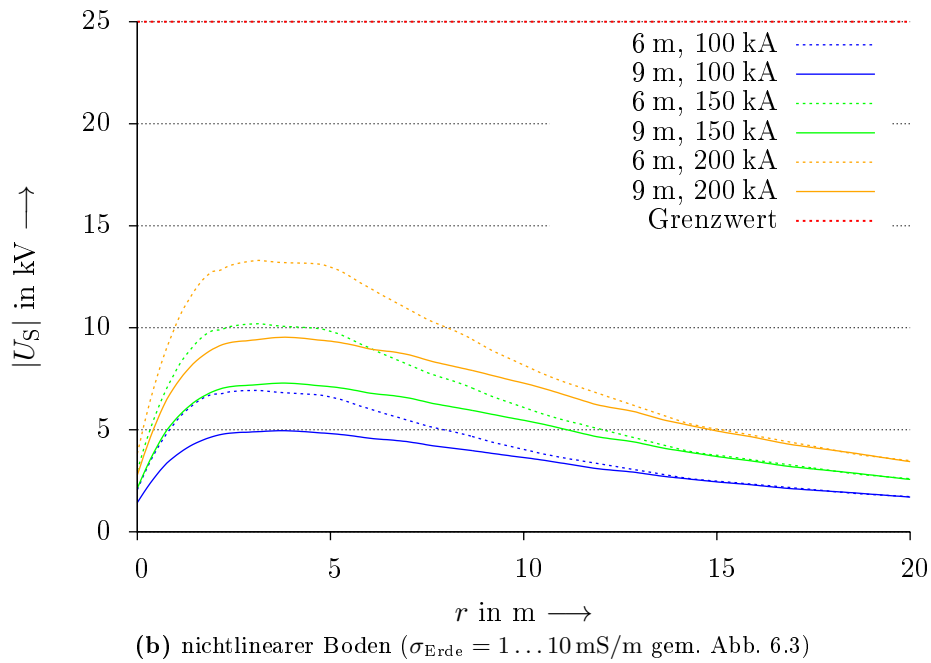
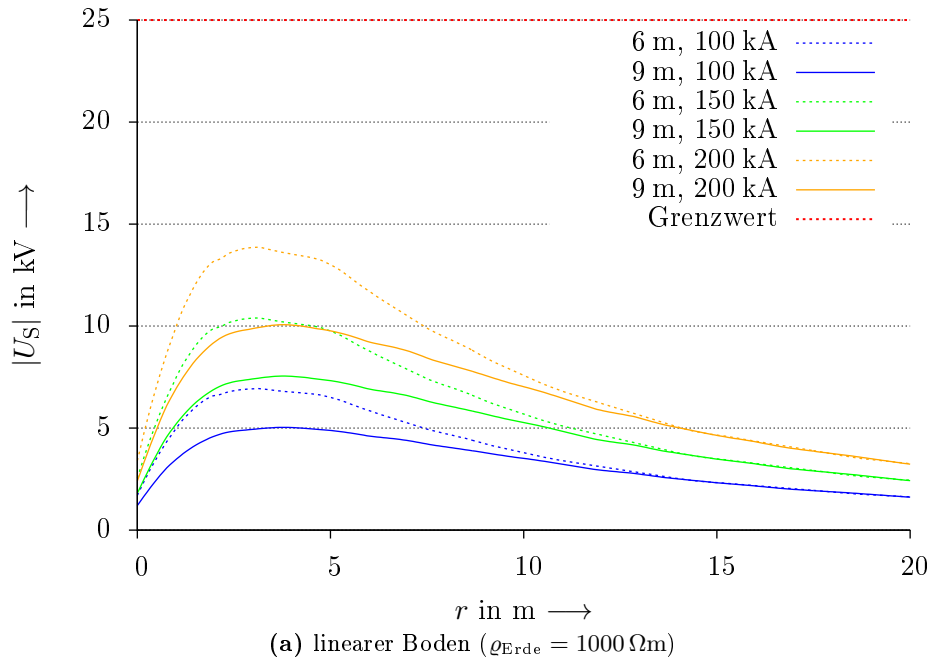


**Abbildung B.44.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Schrägerdern Typ 1 unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen

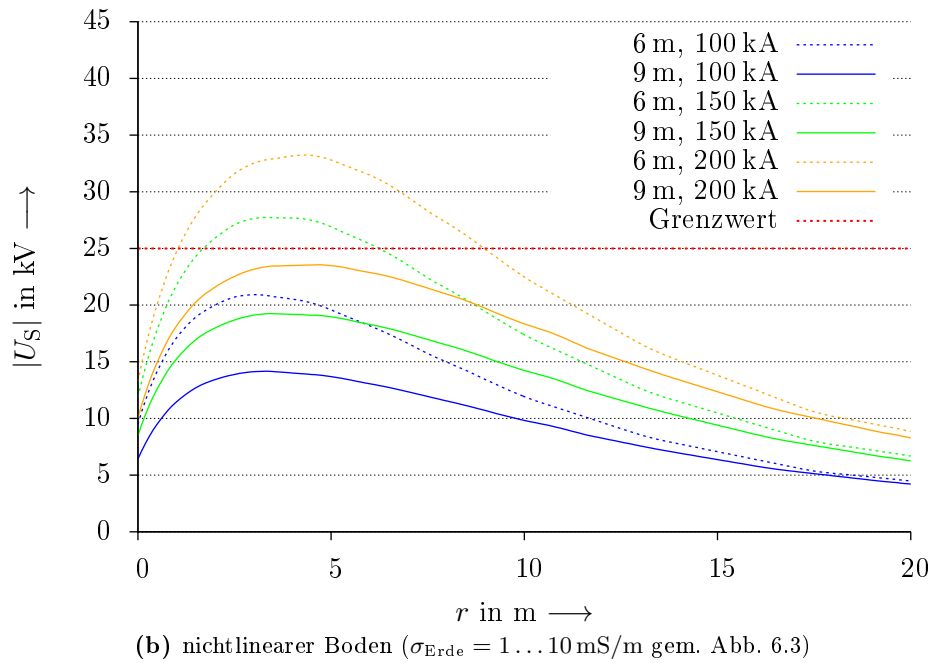
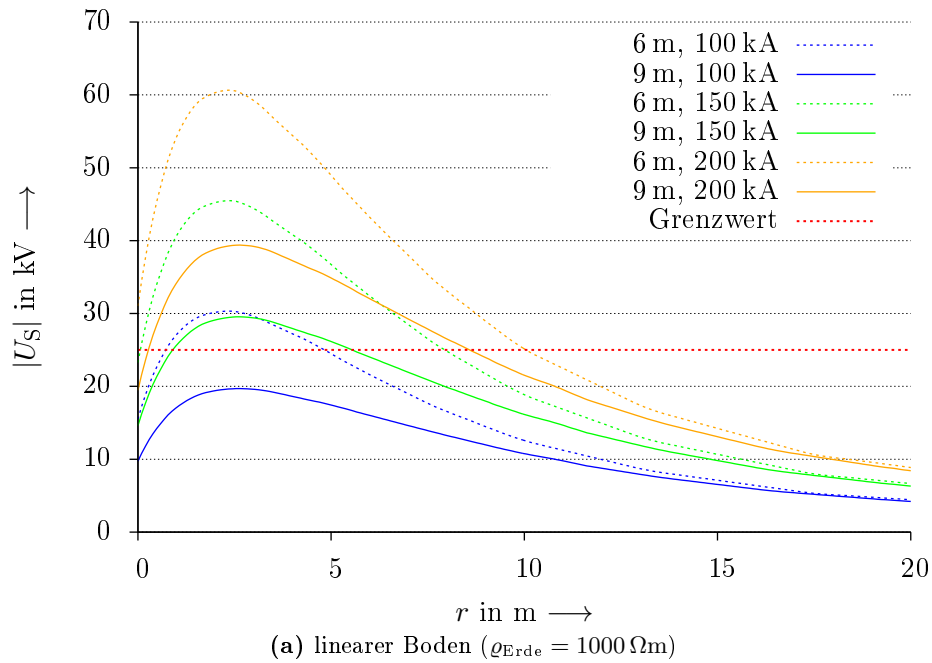


**Abbildung B.45.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Schrägerdern Typ 1 unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$

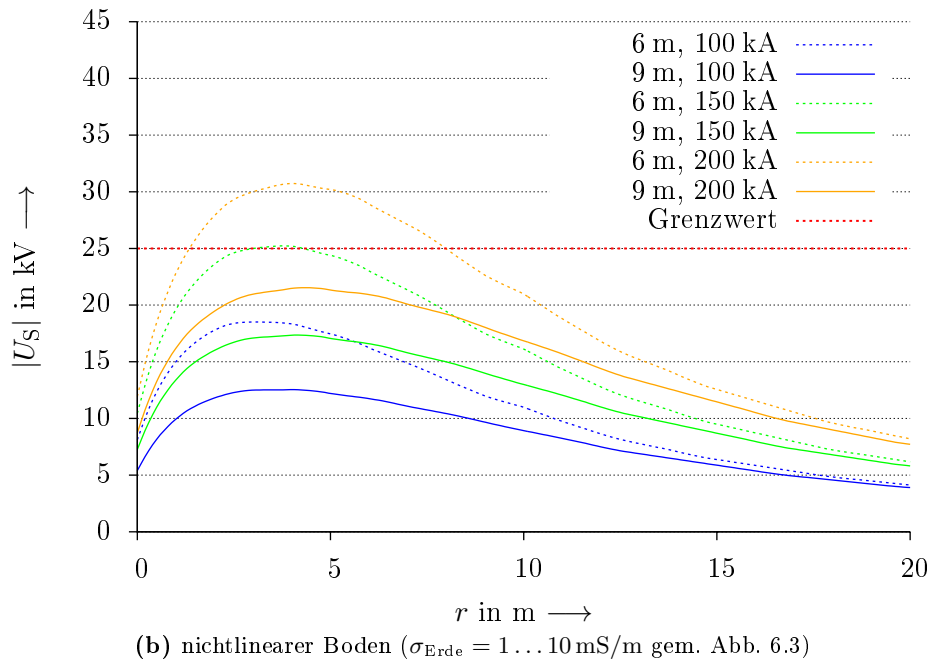
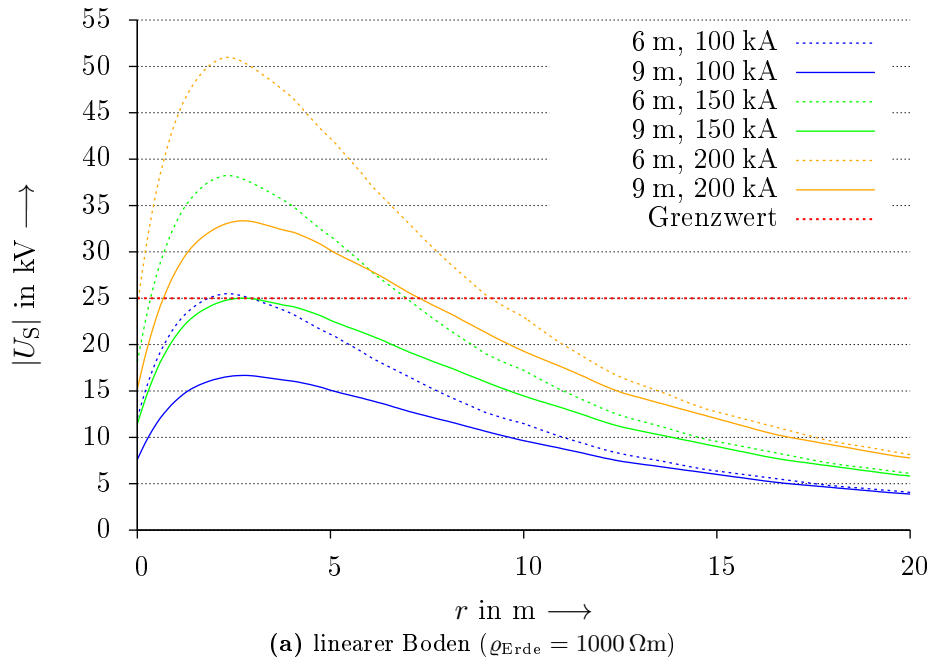


**Abbildung B.46.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Schrägerdern Typ 1 unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen

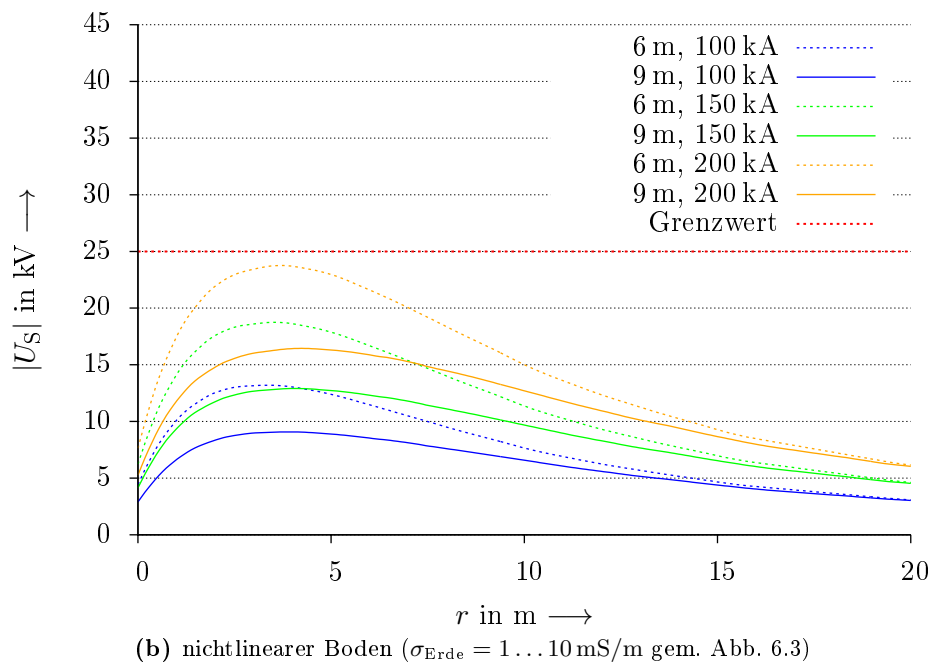
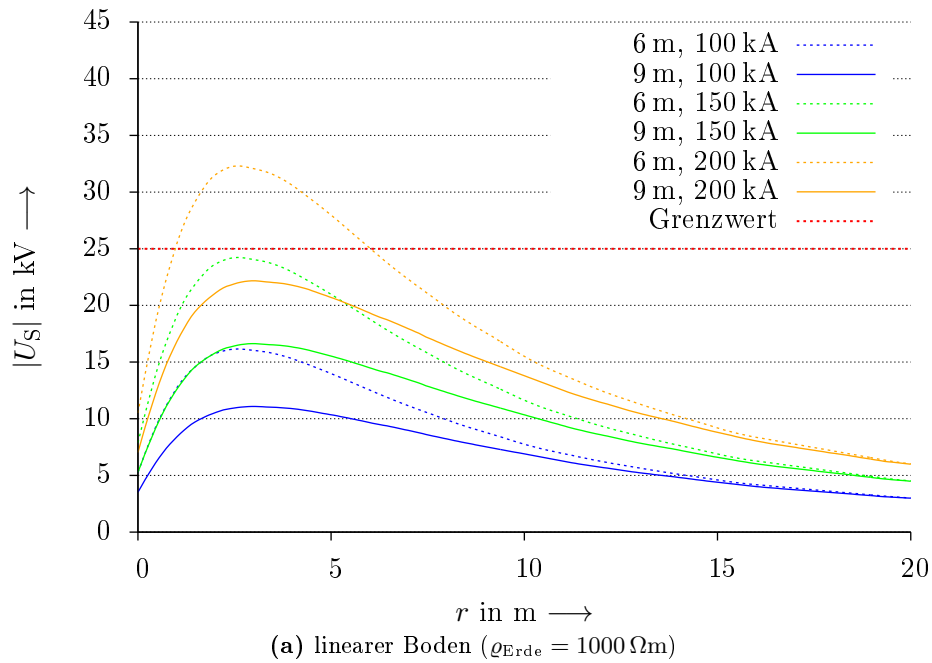


**Abbildung B.47.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Schrägerdern Typ 2 unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$



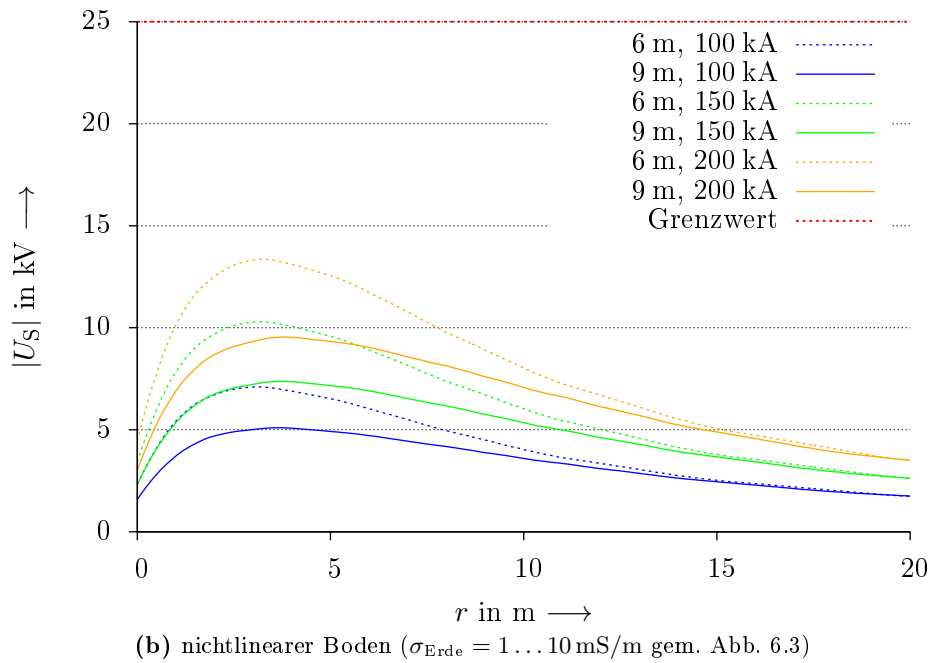
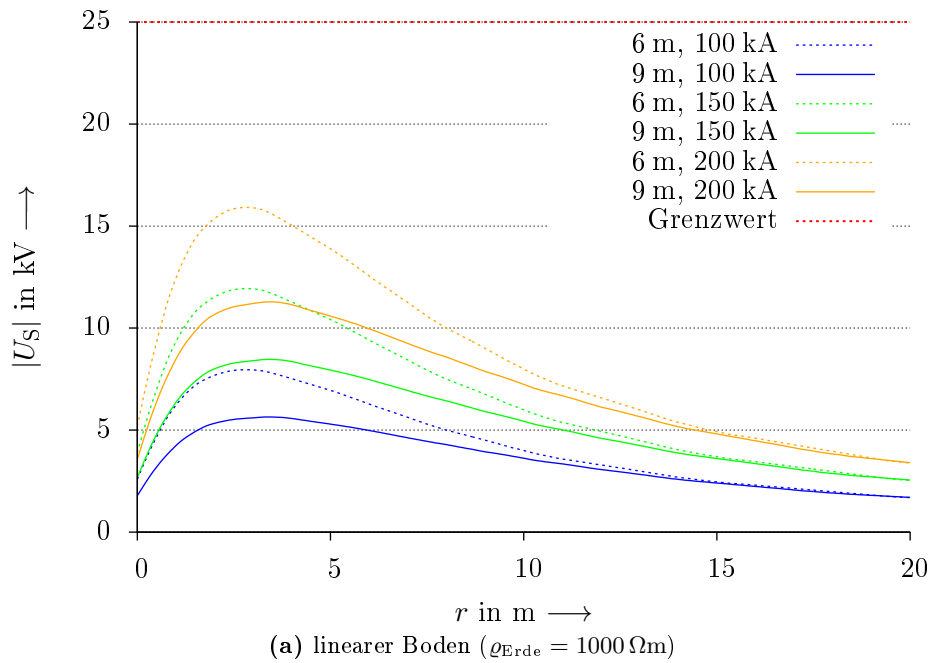
**Abbildung B.48.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Schrägerdern Typ 2 unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen



**Abbildung B.49.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Schrägerdern Typ 2 unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$



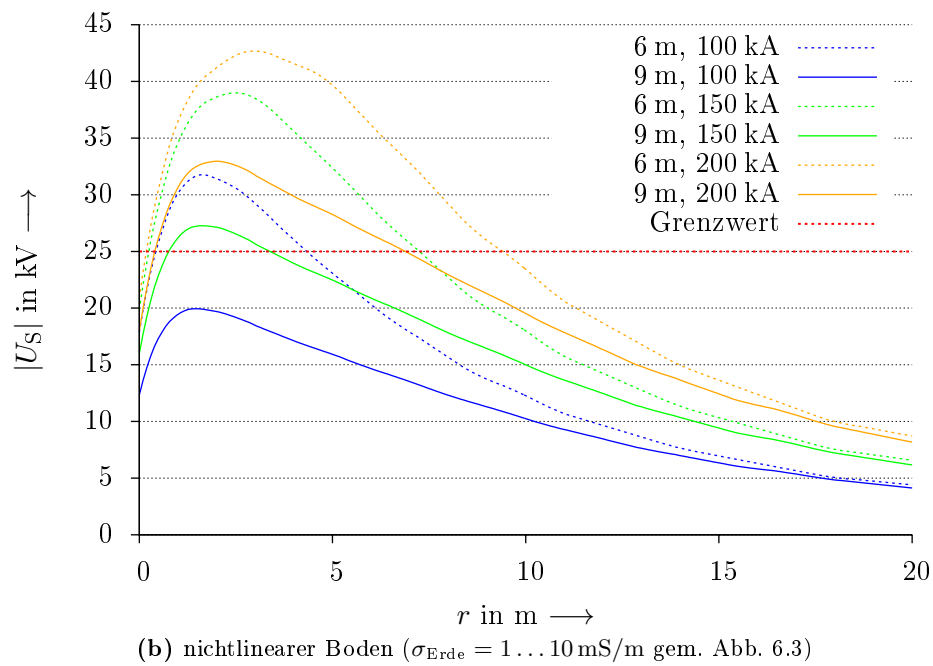
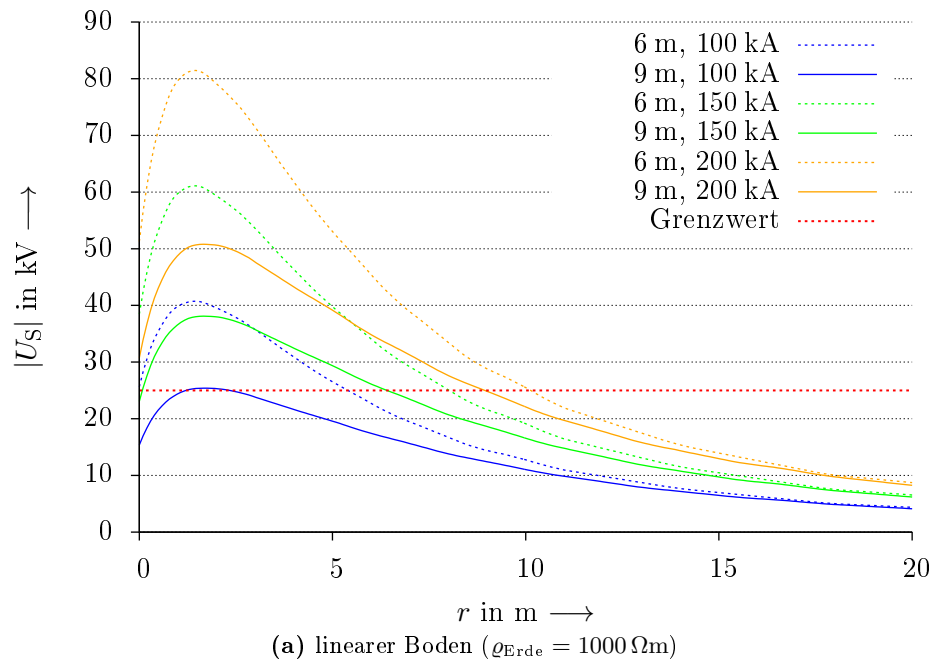


**Abbildung B.50.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Schrägerdern Typ 2 unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m}$

### **B.3. Nichtkonventionelle Erdungskonzepte**

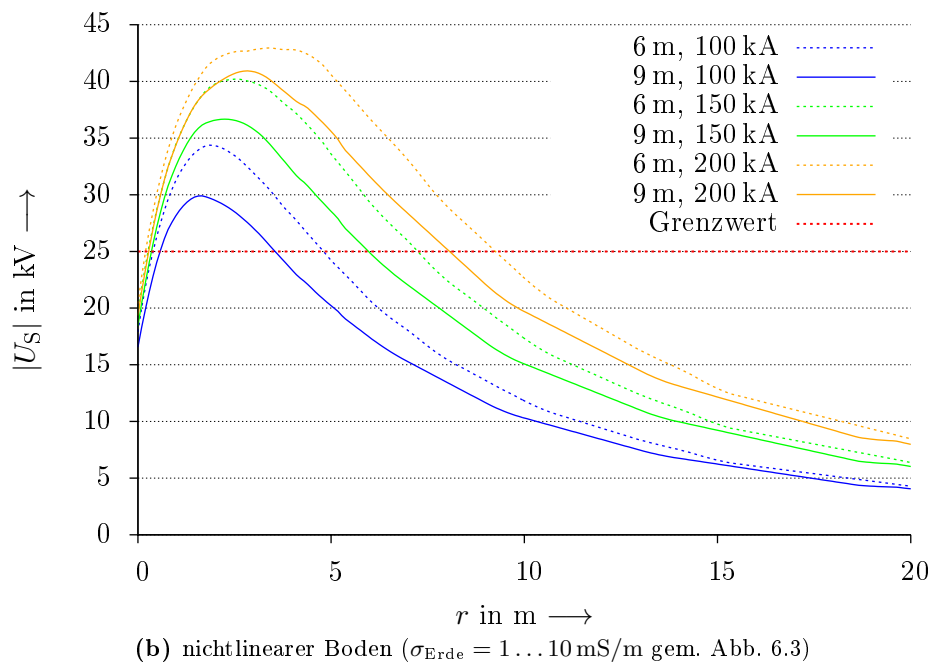
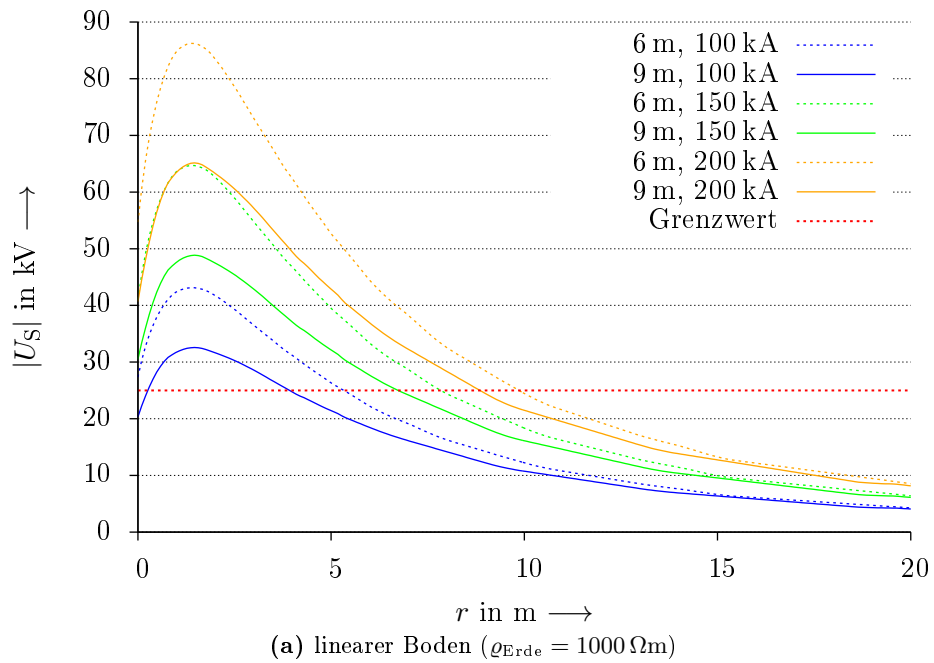
Die Graphen in diesem Abschnitt sind Ergänzungen zu den Simulationen nichtkonventioneller Erdungskonzepte in Kapitel 7.2.

- Nach innen gerichtete Schrägerder: Seite 227–233
- Sternerder im 45°-Winkel: Seite 234–237
- Sternerder im 90°-Winkel: Seite 238–241
- Fundamenterder mit zusätzlichen Erderbögen: Seite 242–244
- Einsatz von Bodenverbesserern unter Fundamenterdern: Seite 245

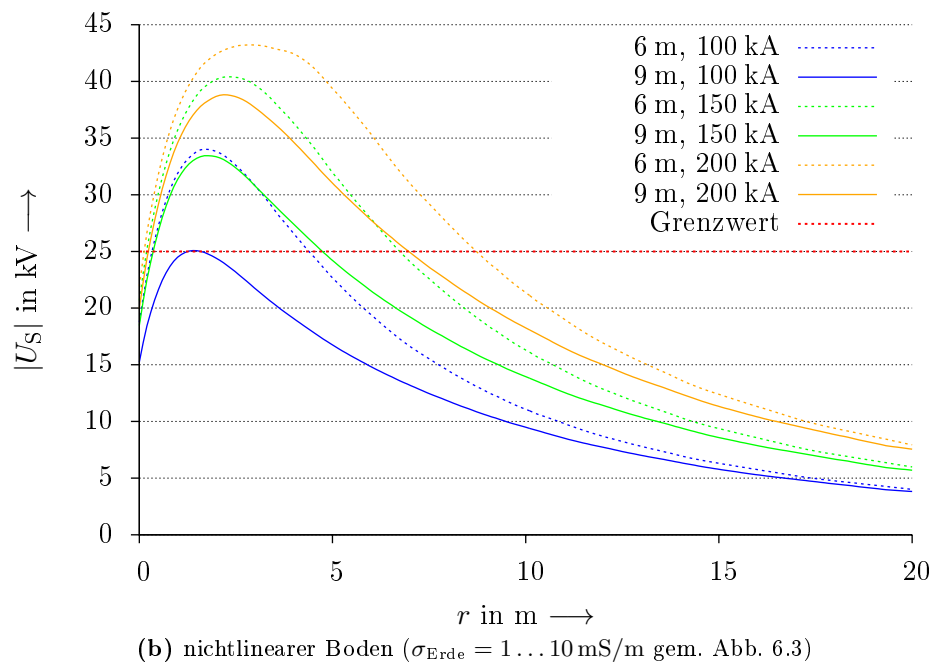
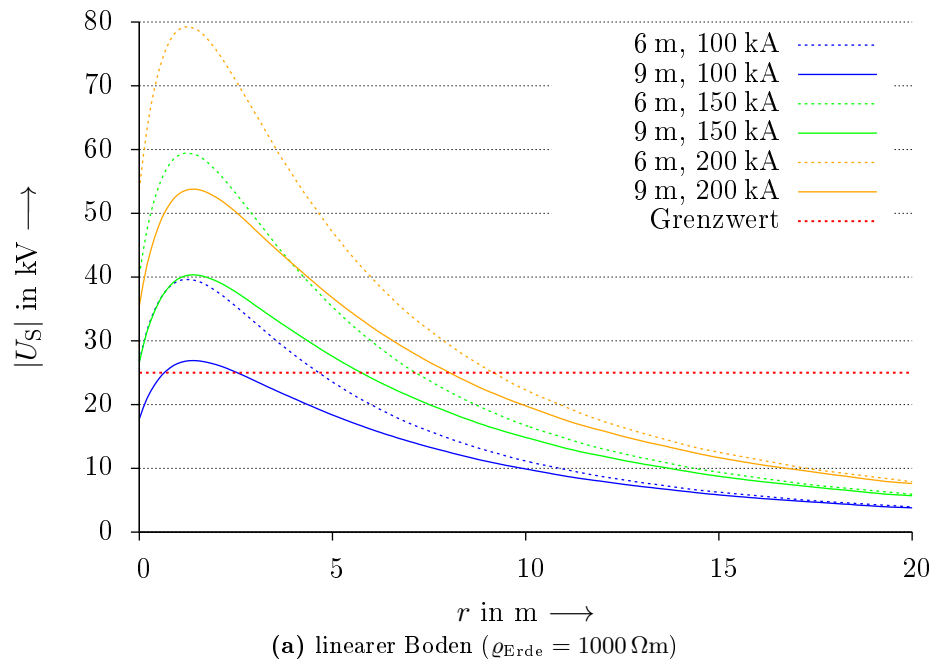


**Abbildung B.51.:** Schrittspannungen bei Verwendung von nach innen gerichteten Schrägerdern „kreuzend“ unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen

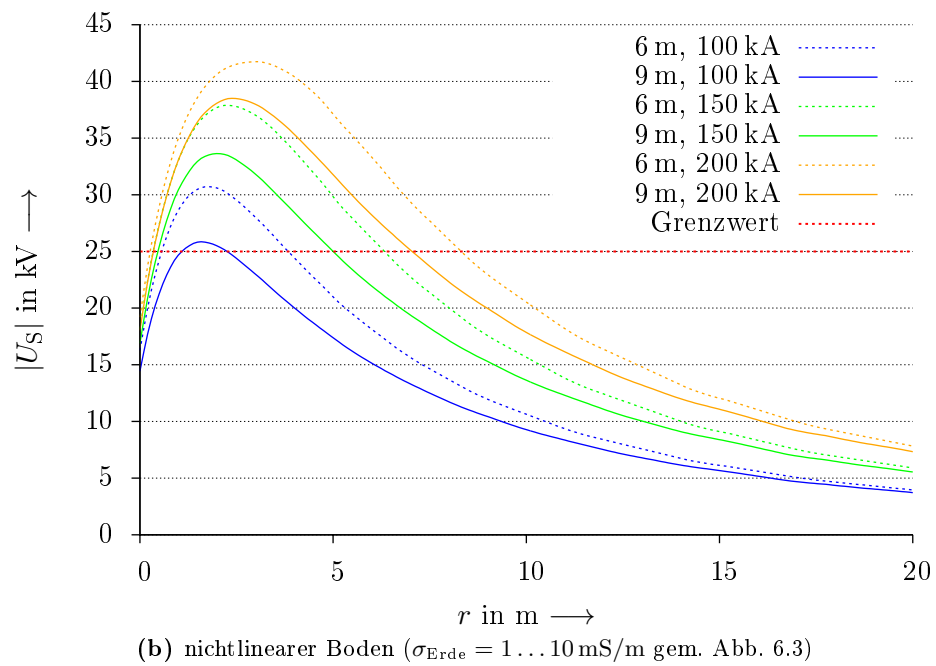
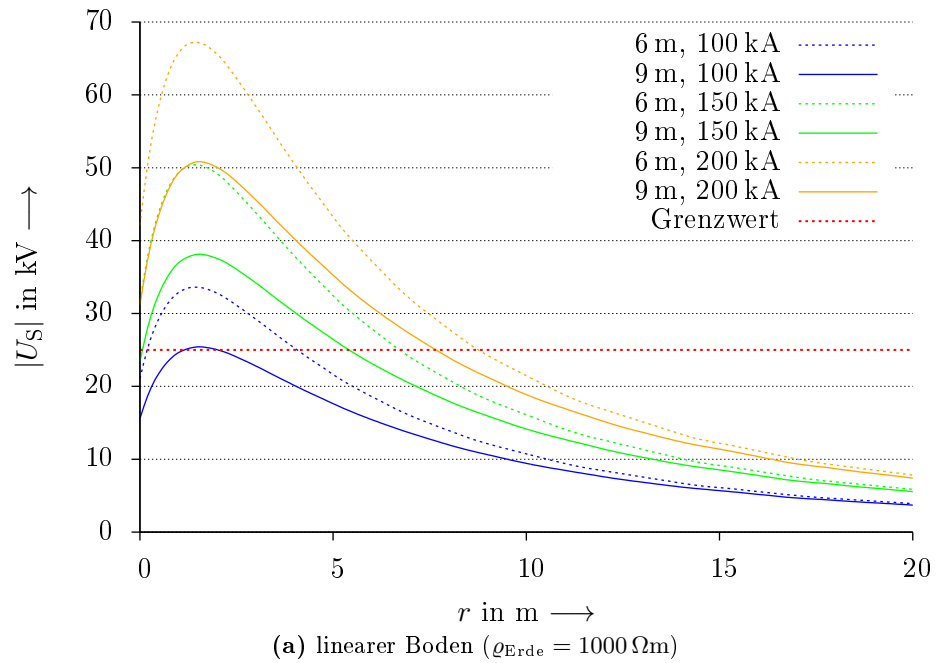


**Abbildung B.52.:** Schrittspannungen bei Verwendung von nach innen gerichteten Schrägerdern „nicht kreuzend“ unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$

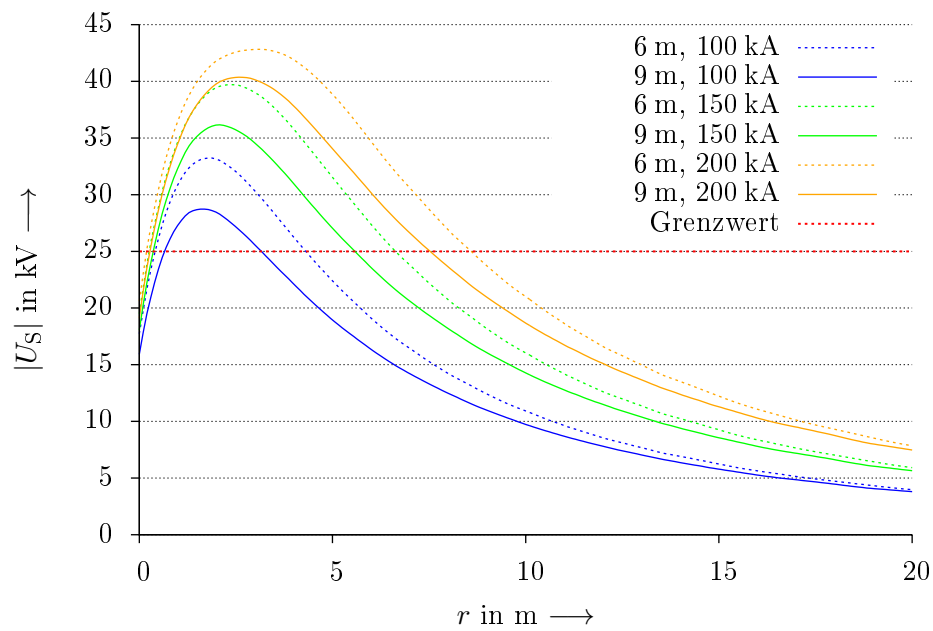
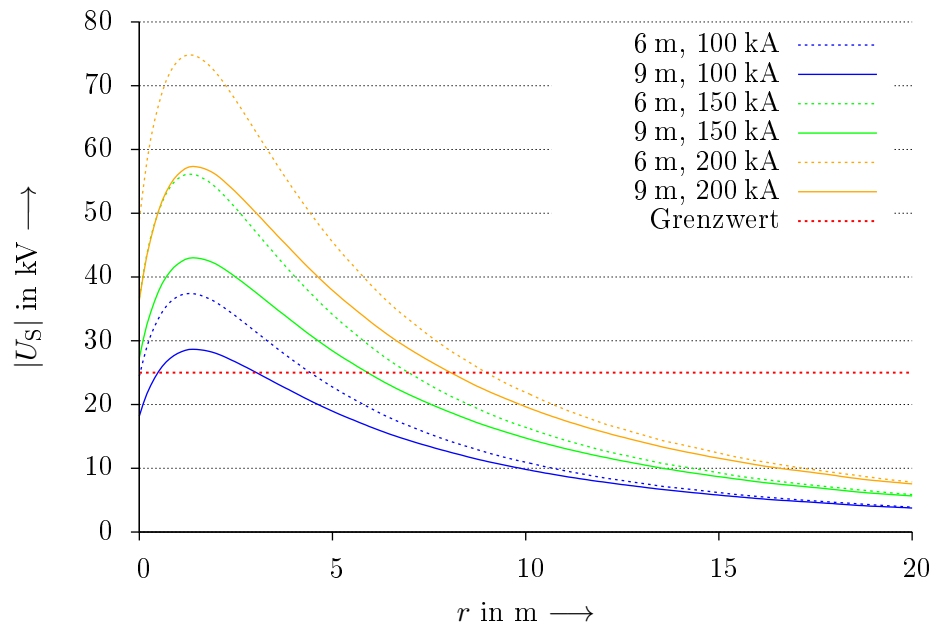


**Abbildung B.53.:** Schrittspannungen bei Verwendung von nach innen gerichteten Schrägerdern „kreuzend“ unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen

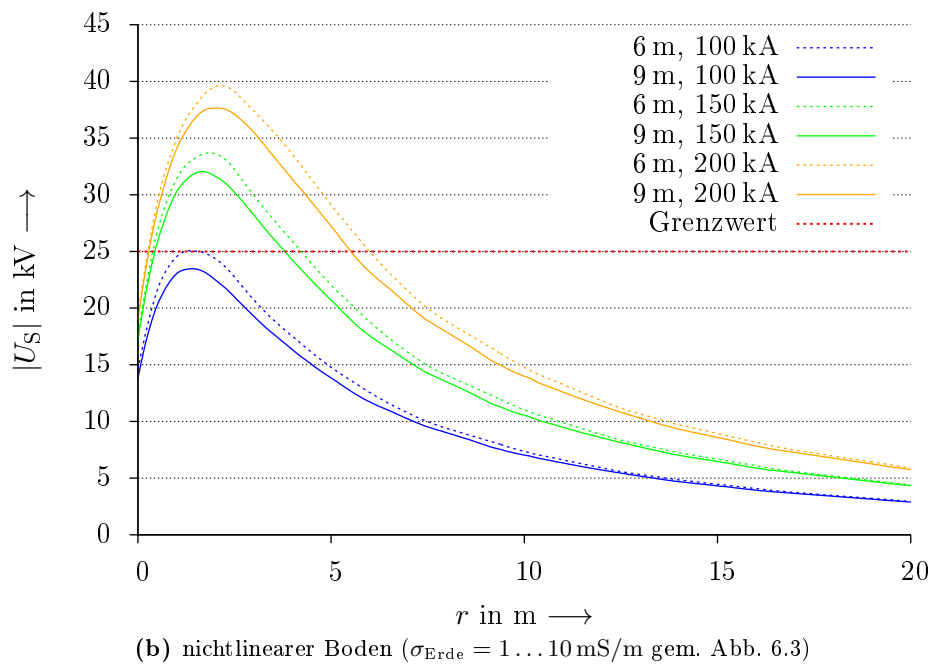
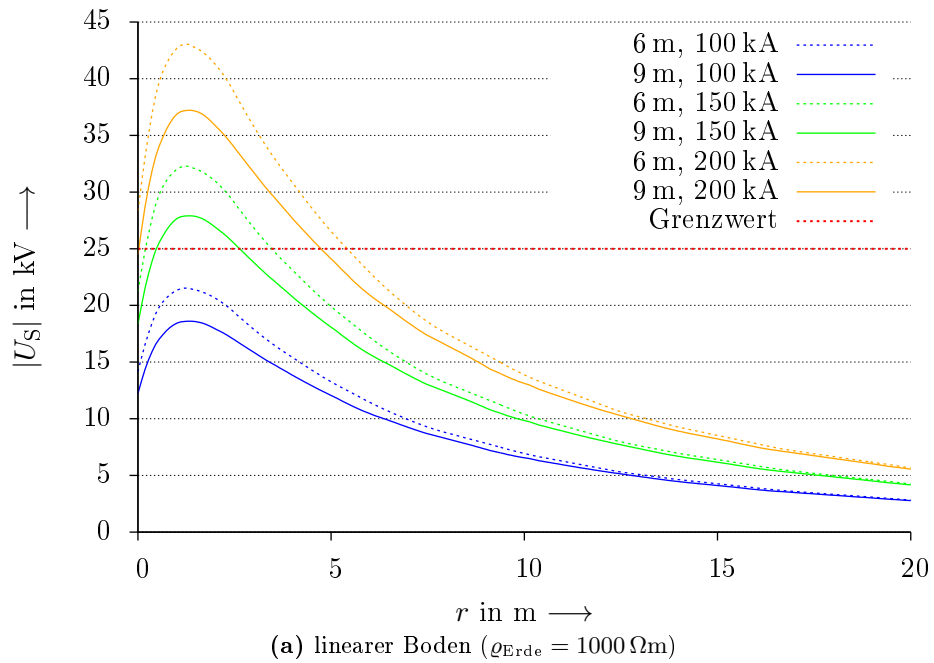


**Abbildung B.54.:** Schrittspannungen bei Verwendung von nach innen gerichteten Schrägerdern „nicht kreuzend, steil“ unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$



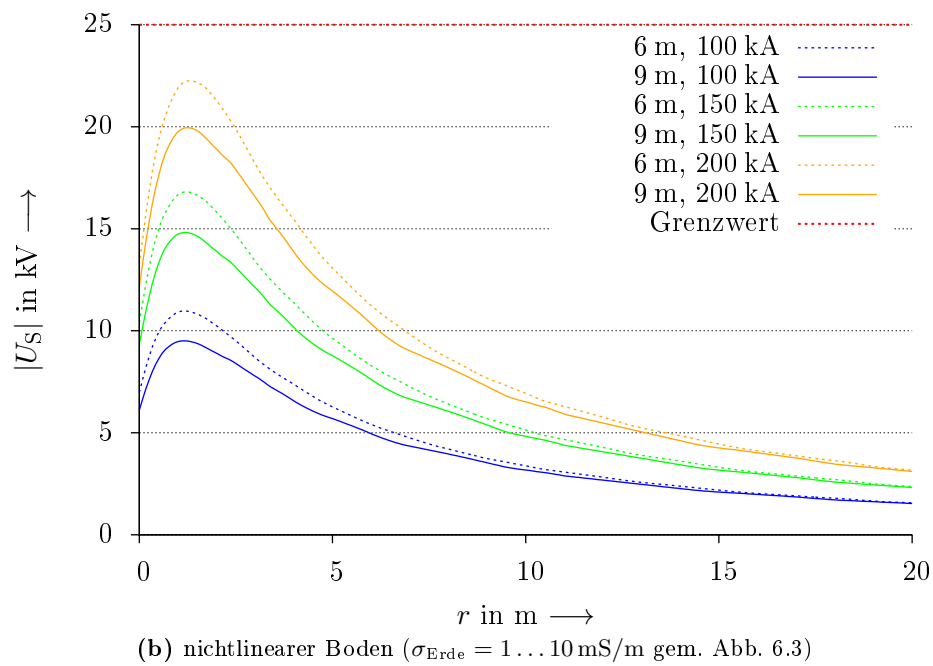
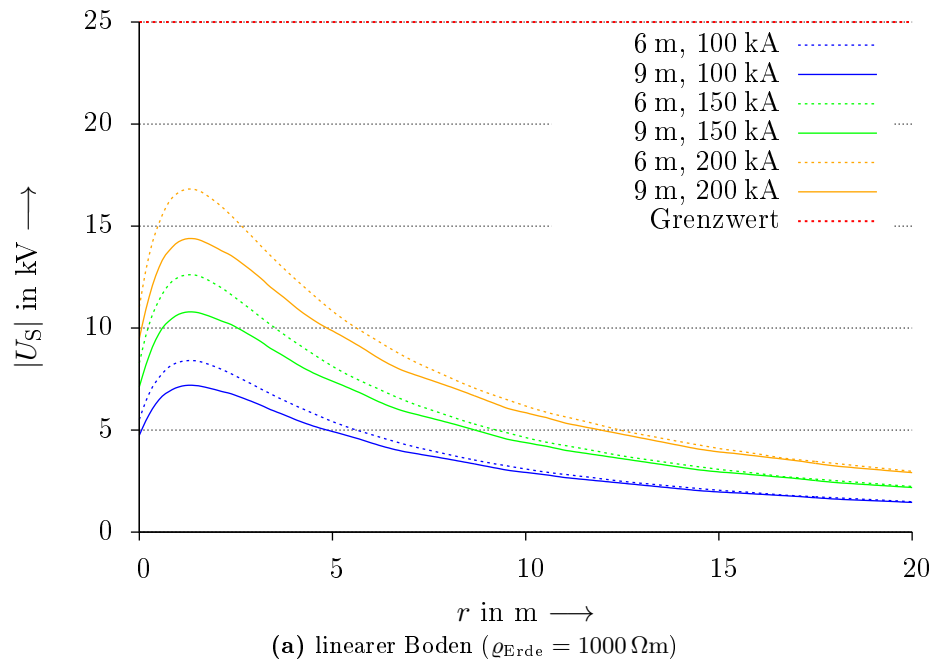
**Abbildung B.55.:** Schrittspannungen bei Verwendung von nach innen gerichteten Schrägerdern „nicht kreuzend, flach“ unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen



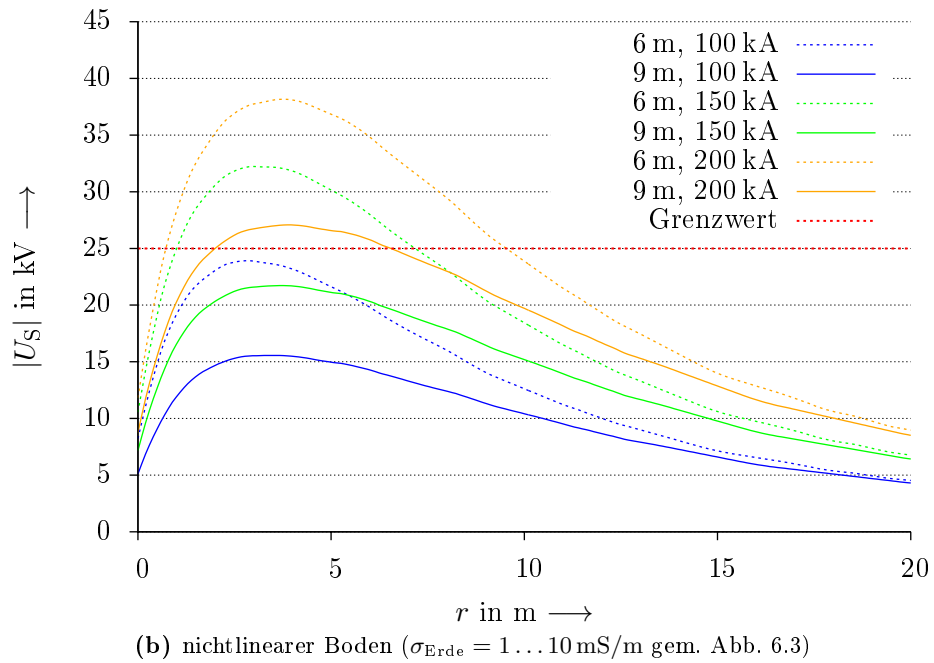
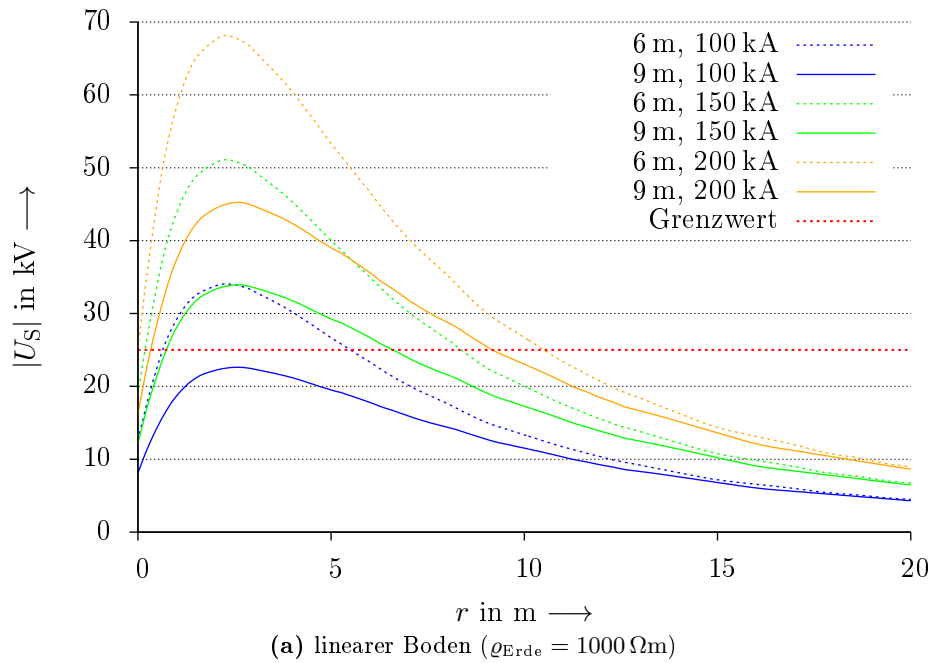
**Abbildung B.56.:** Schrittspannungen bei Verwendung von nach innen gerichteten Schrägerdern unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$



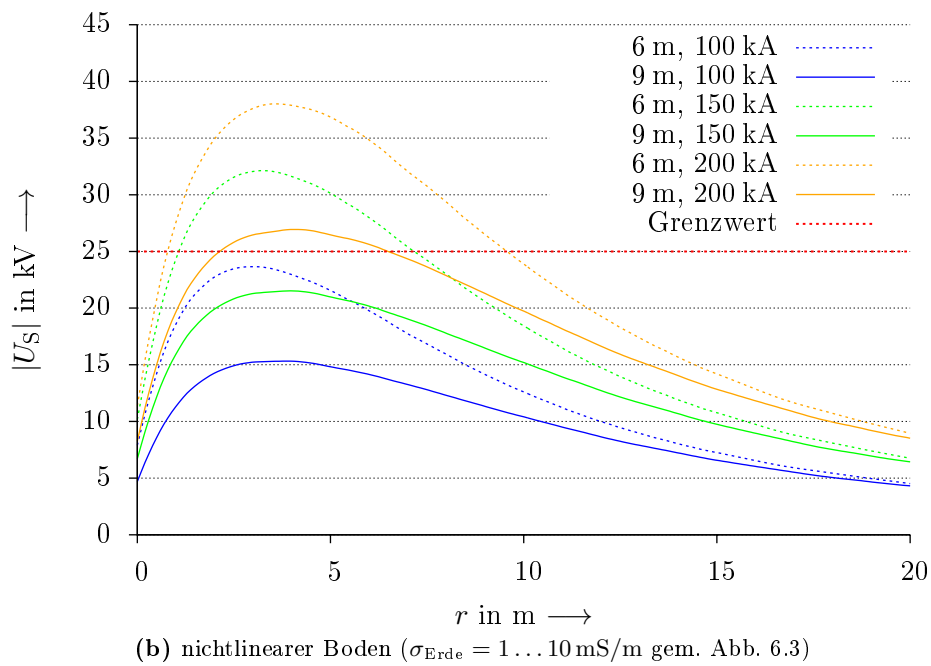
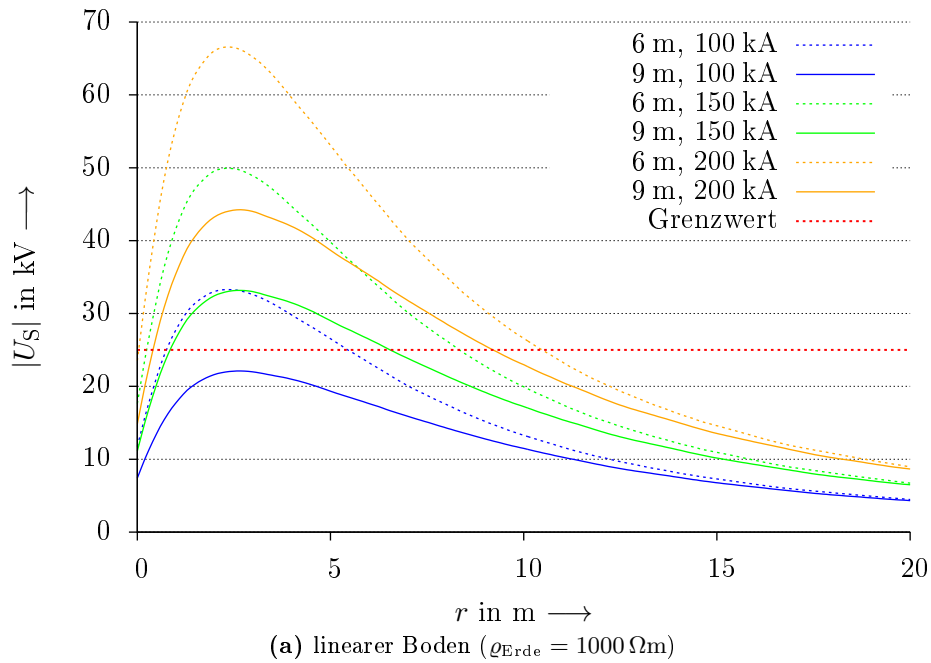


**Abbildung B.57.:** Schrittspannungen bei Verwendung von nach innen gerichteten Schrägerdern unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen

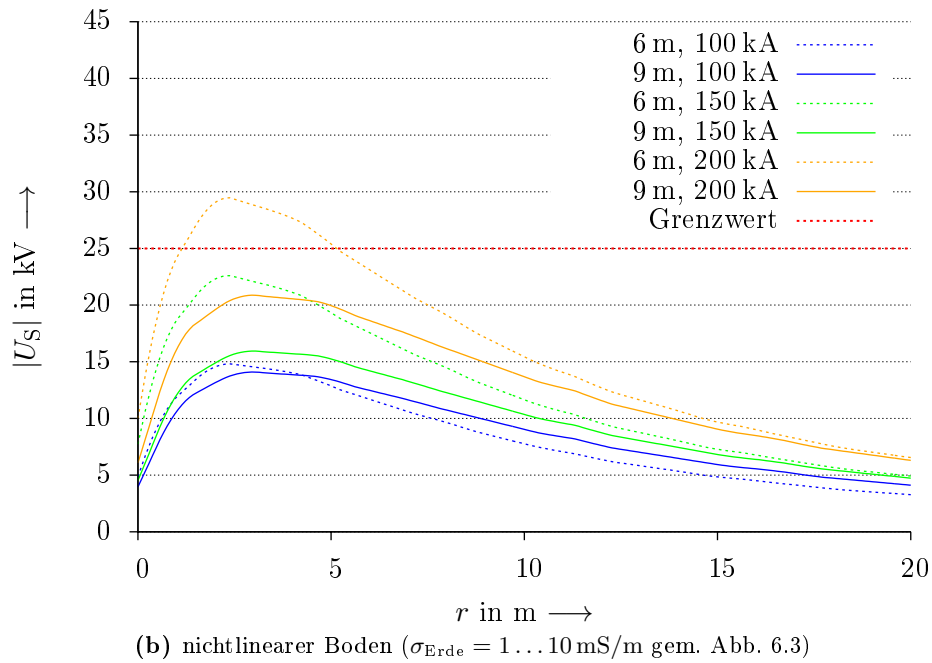
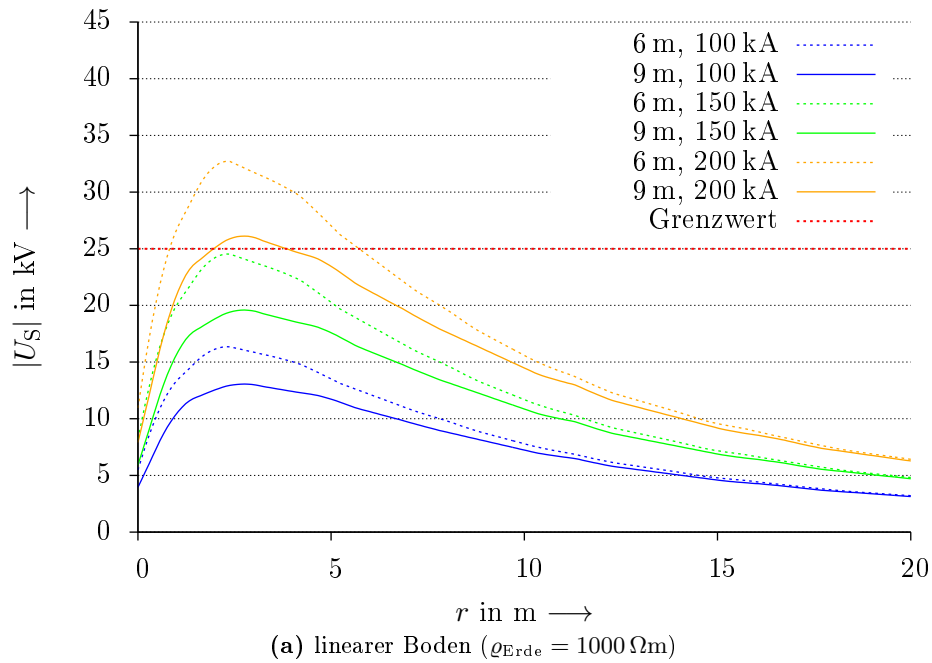


**Abbildung B.58.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Sternerdern im  $45^\circ$ -Winkel unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$

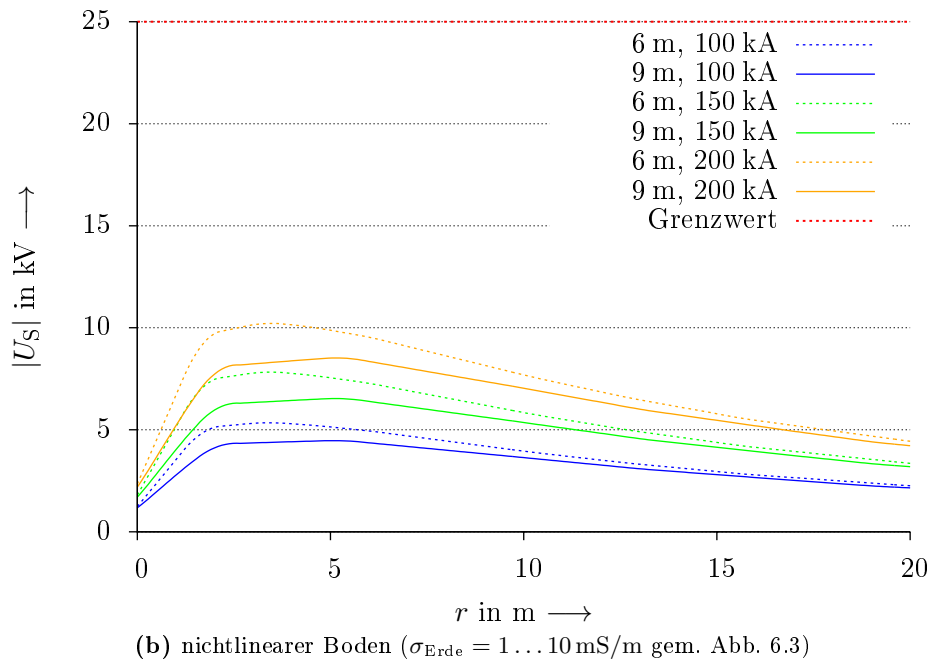
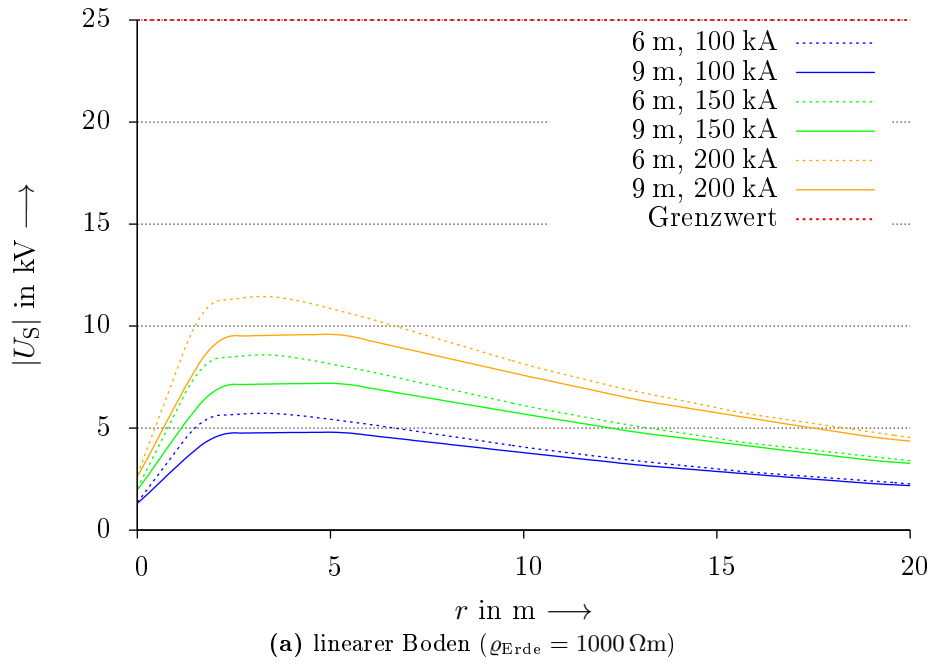


**Abbildung B.59.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Sternerdern im  $45^\circ$ -Winkel unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen

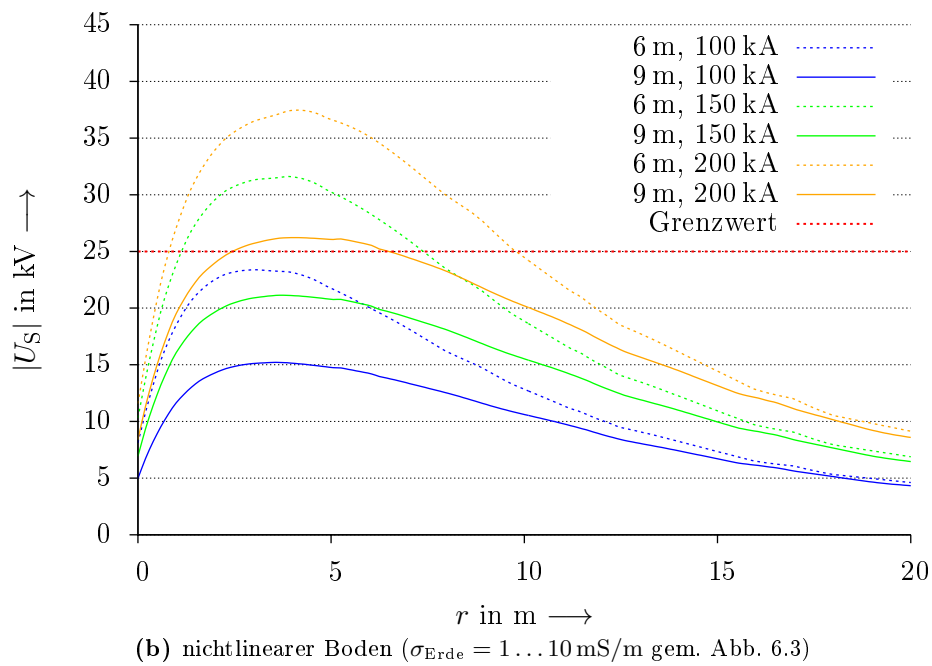
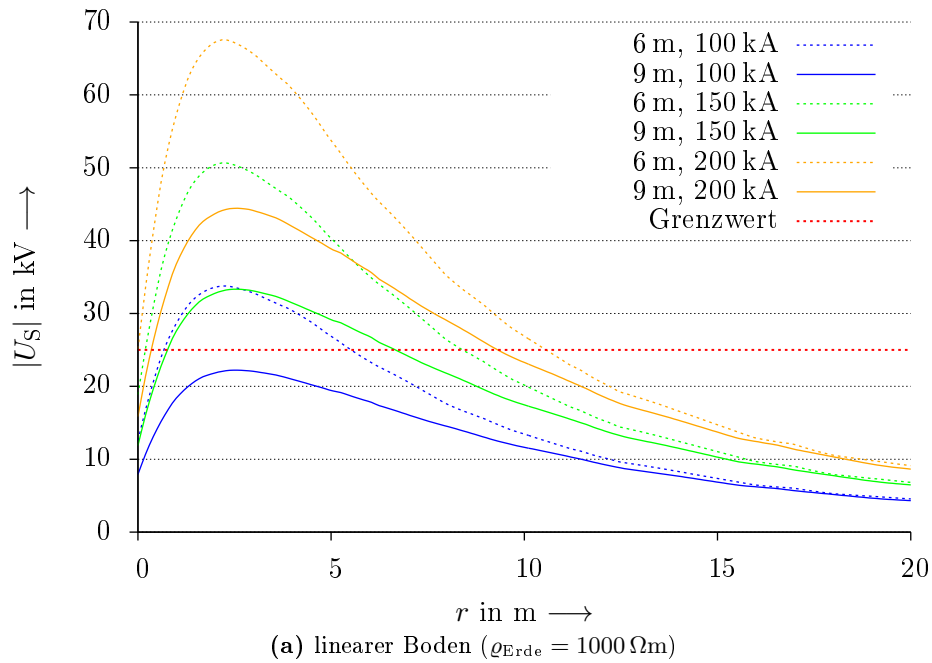


**Abbildung B.60.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Sternerdern im  $45^\circ$ -Winkel unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$

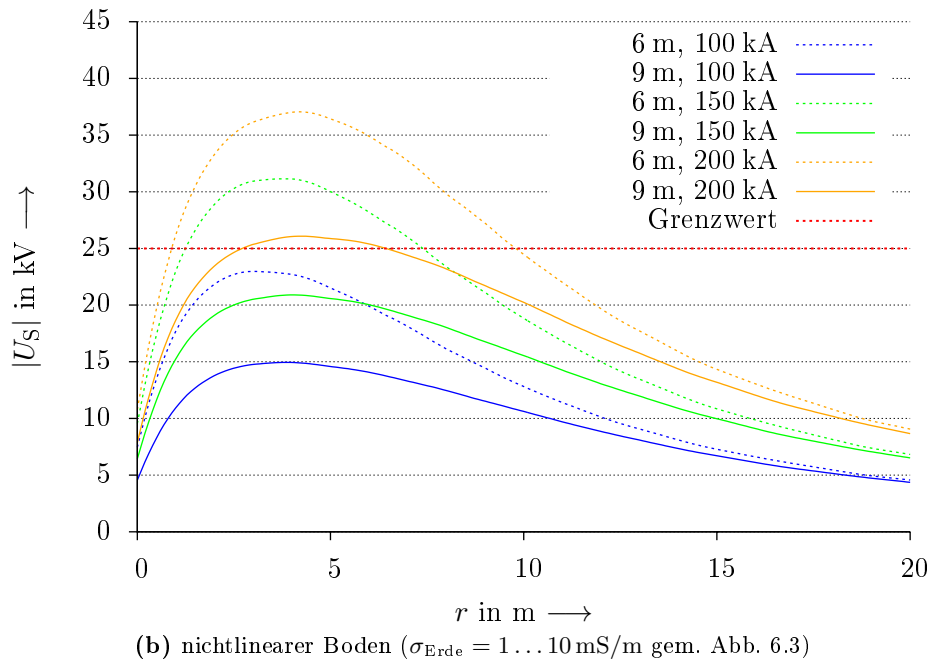
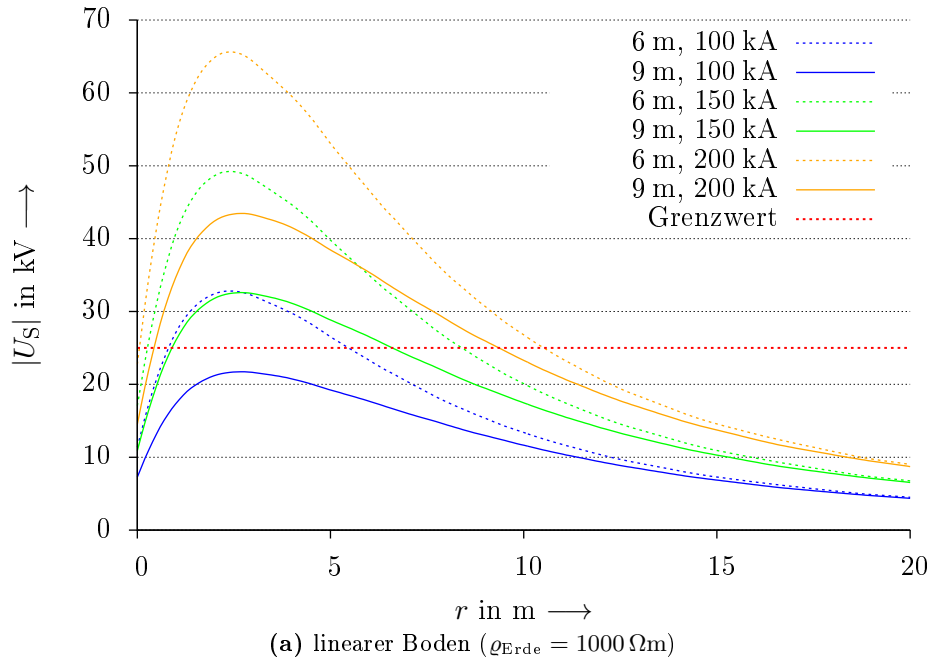


**Abbildung B.61.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Sternerdern im  $45^\circ$ -Winkel unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen

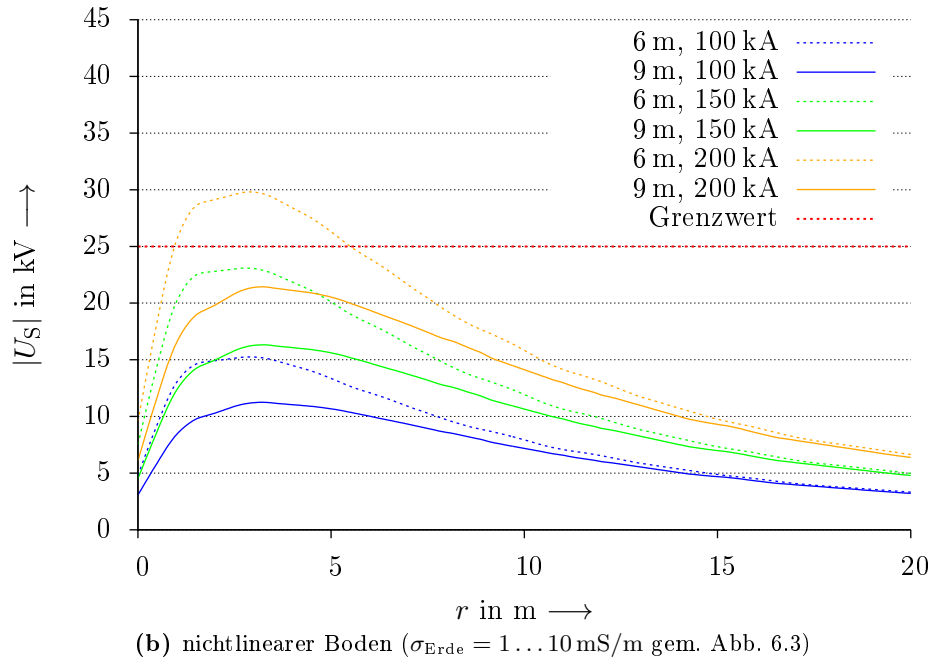
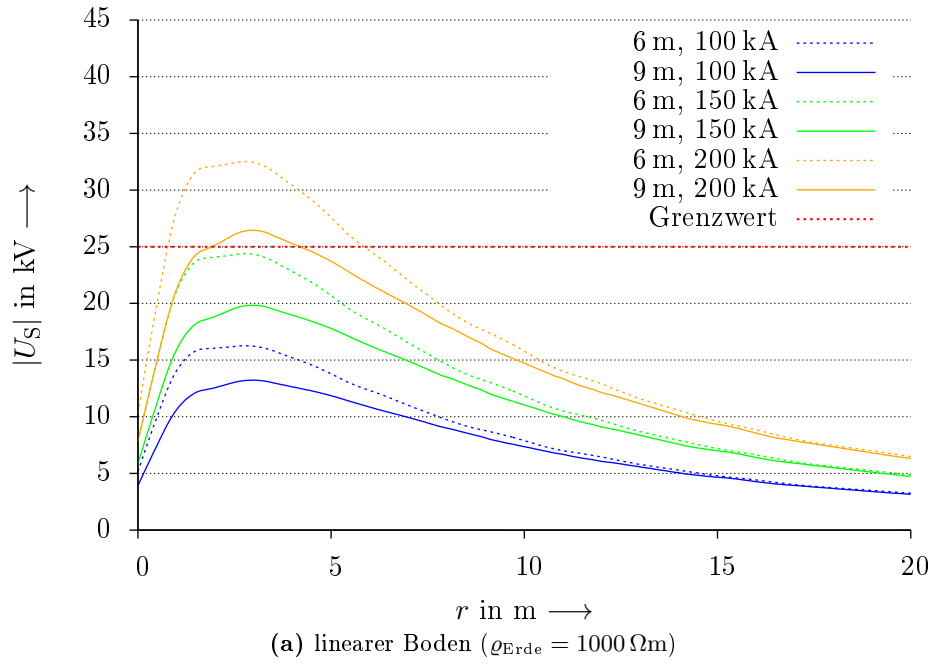


**Abbildung B.62.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Sternerdern im  $90^\circ$ -Winkel unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$



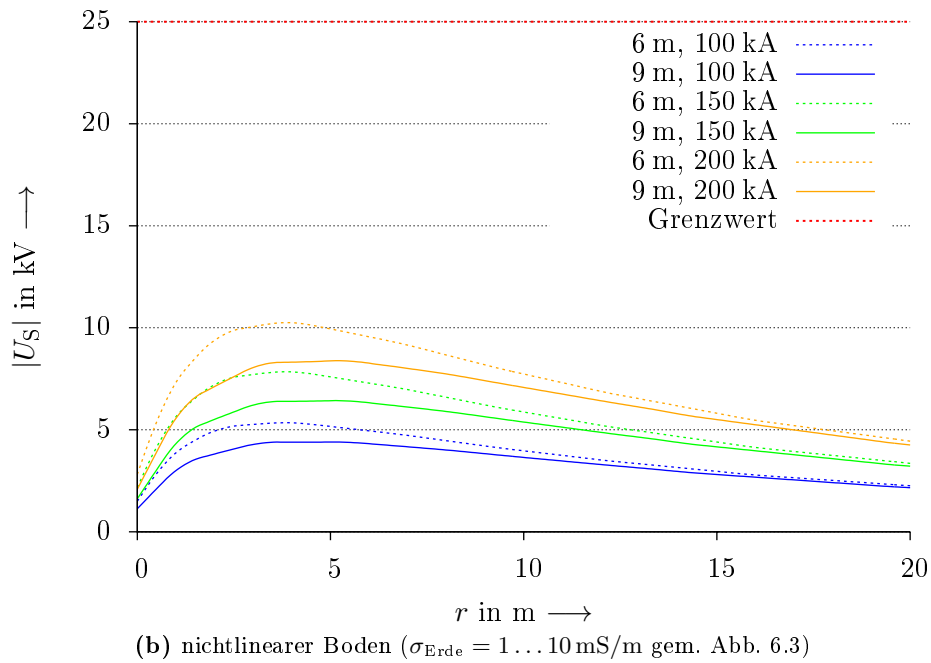
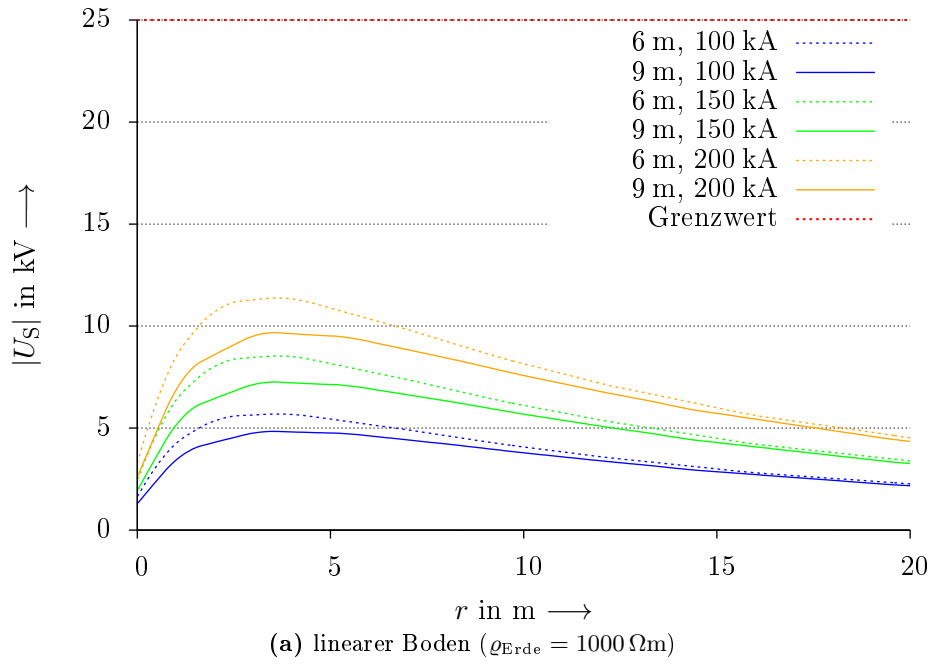
**Abbildung B.63.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Sternerdern im  $90^\circ$ -Winkel unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen



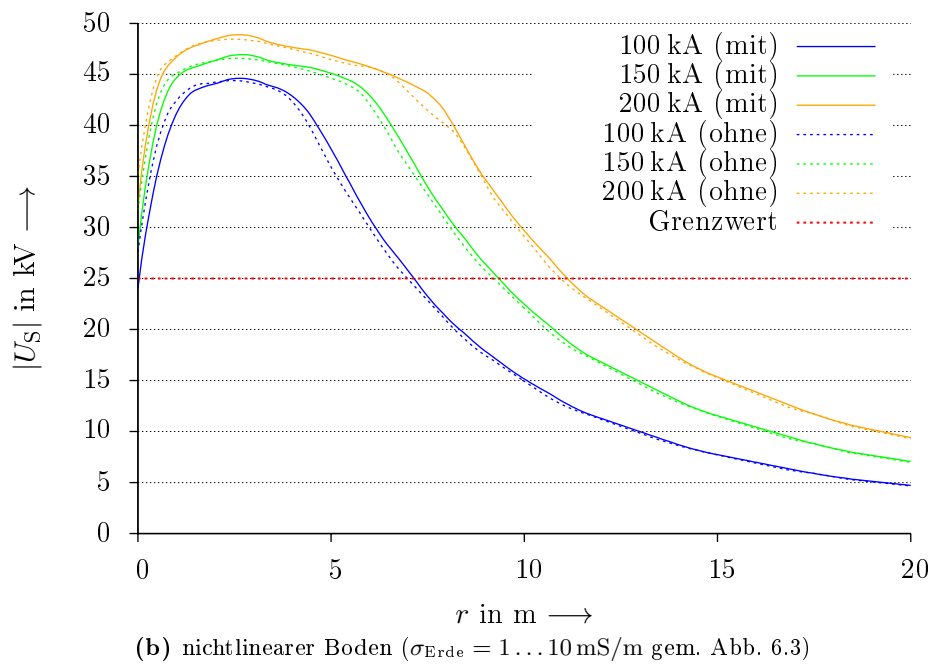
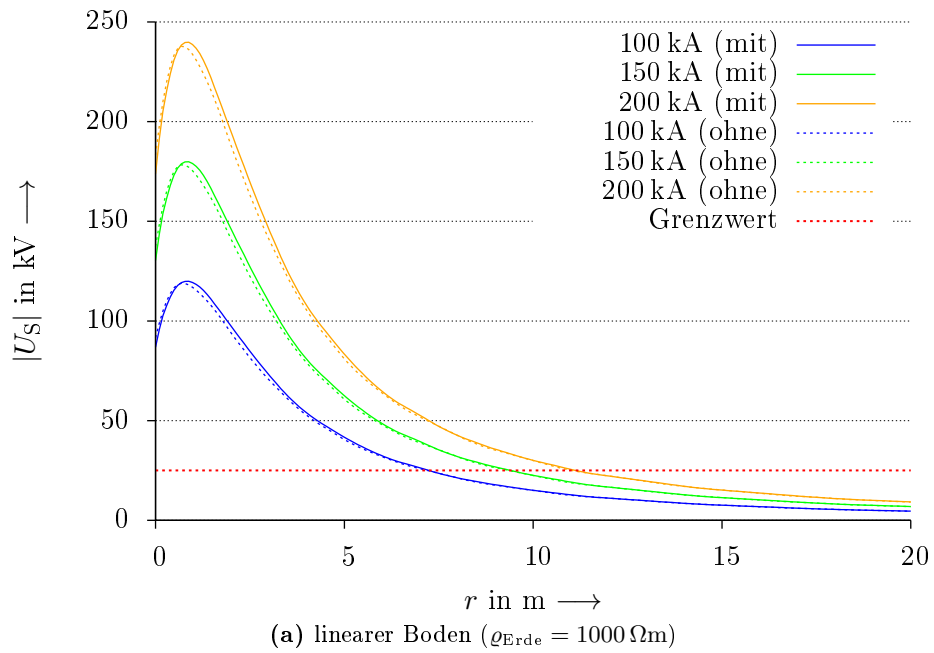
**Abbildung B.64.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Sternerdern im  $90^\circ$ -Winkel unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$



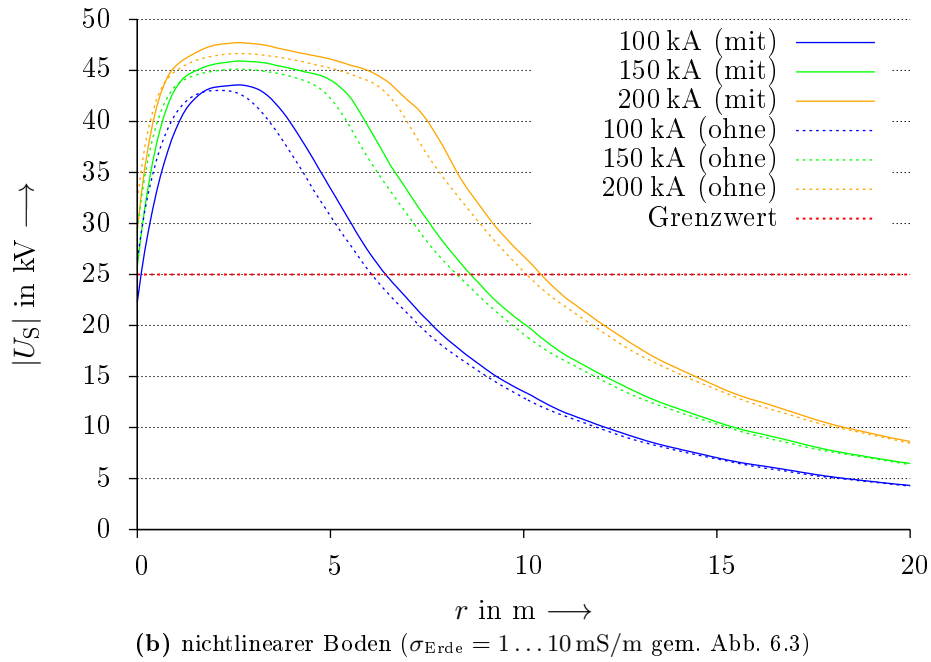
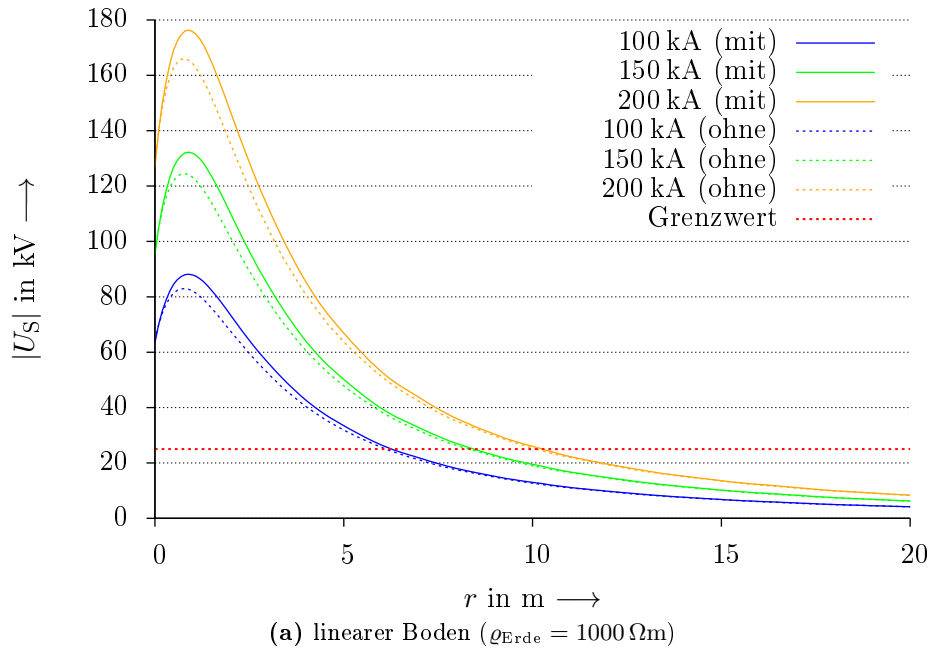


**Abbildung B.65.:** Schrittspannungen bei Verwendung von Sternerdern im  $90^\circ$ -Winkel unterschiedlicher Länge und bei unterschiedlichen Blitzströmen um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m}$

## B. Zusätzliche Graphen

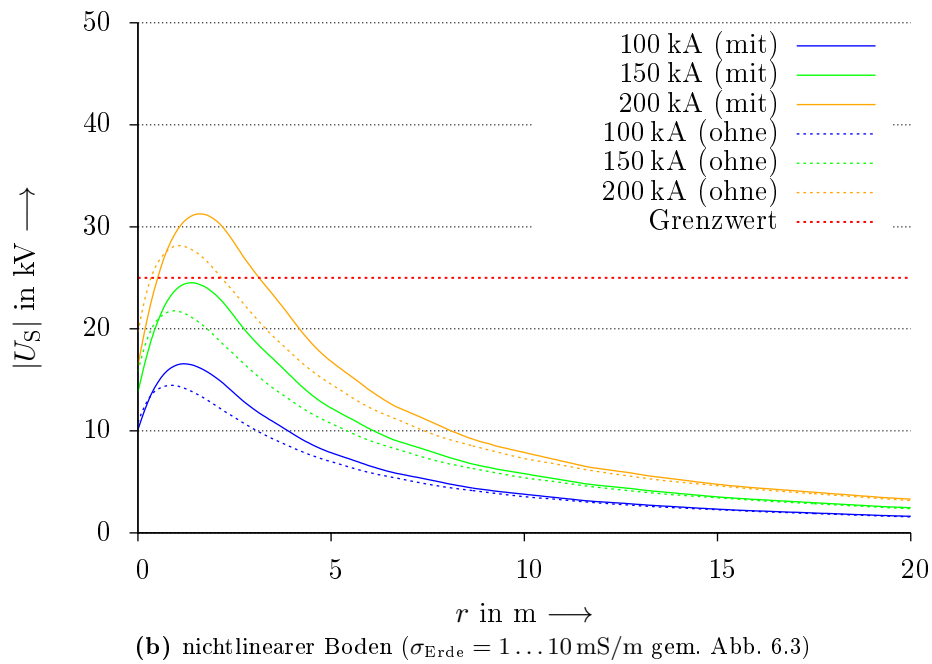
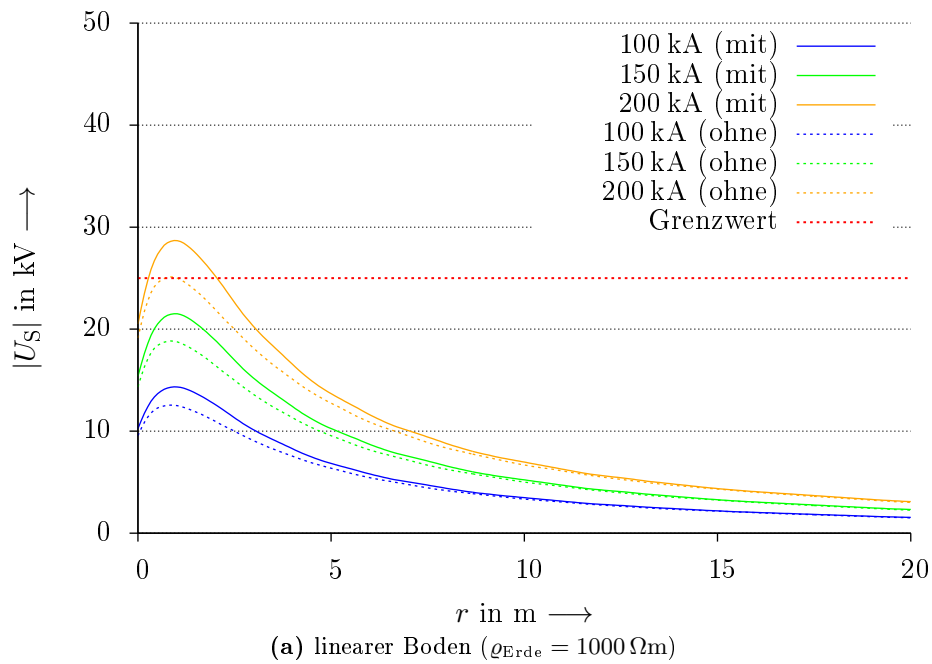


**Abbildung B.66.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  bei einem Fundamenterder mit und ohne zusätzliche Leiterbögen an den Ecken

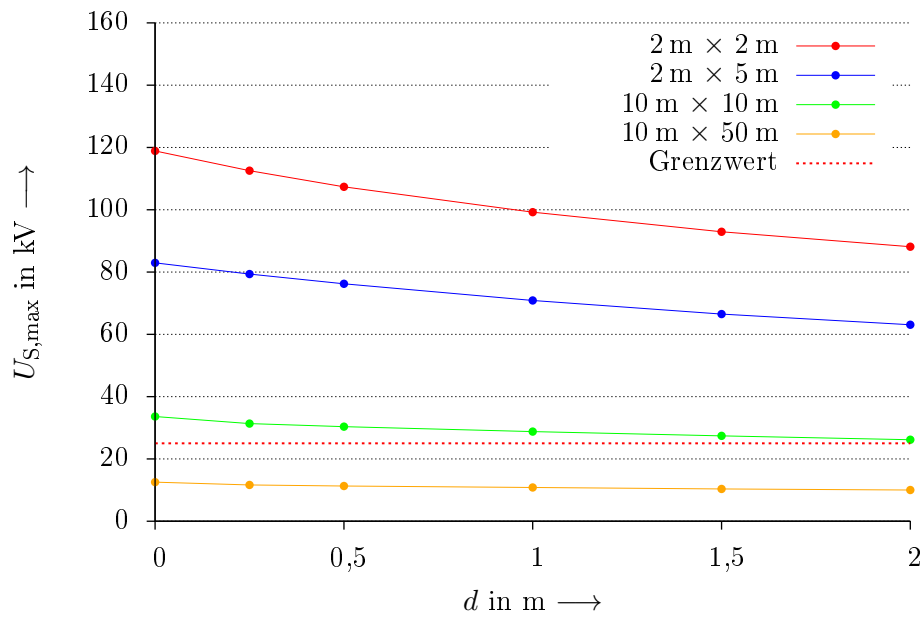


**Abbildung B.67.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  bei einem Fundamenterder mit und ohne zusätzliche Leiterbögen an den Ecken

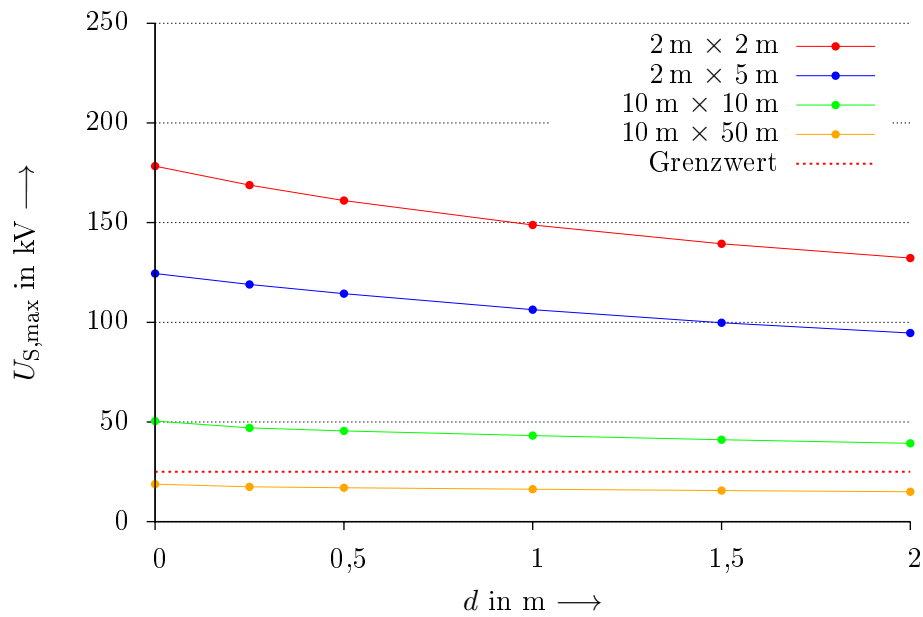
## B. Zusätzliche Graphen



**Abbildung B.68.:** Schrittspannungen um ein Gebäude  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m}$  bei einem Fundamenterder mit und ohne zusätzliche Leiterbögen an den Ecken



**Abbildung B.69.:** Maximal auftretende Schrittspannungen beim Einsatz von Bodenverbesserern mit der Schichtdicke  $d$  unter Fundamenterdern bei unterschiedlichen Gebäudegrößen und  $I = 100$  kA

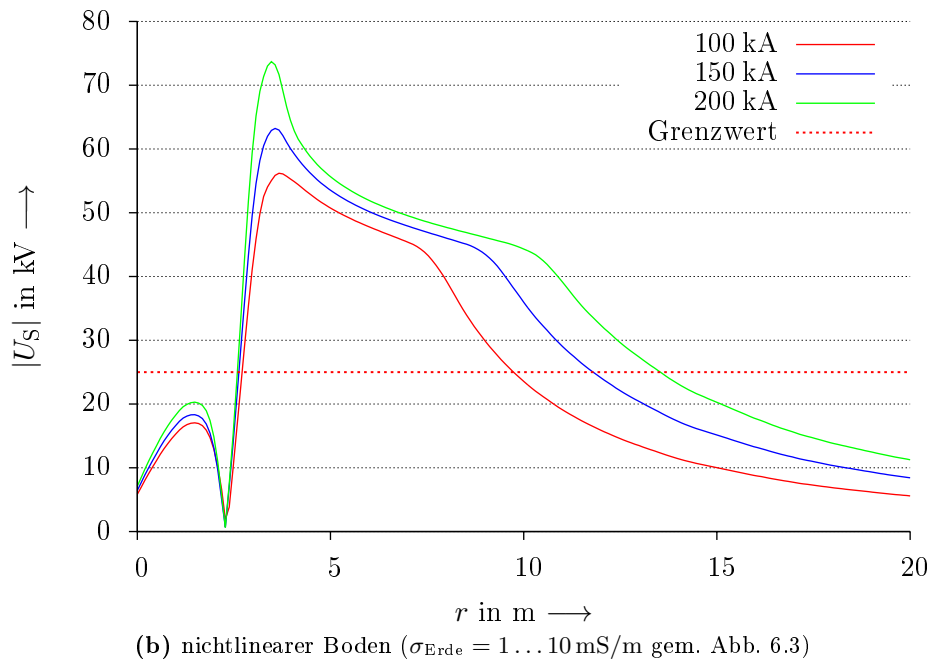
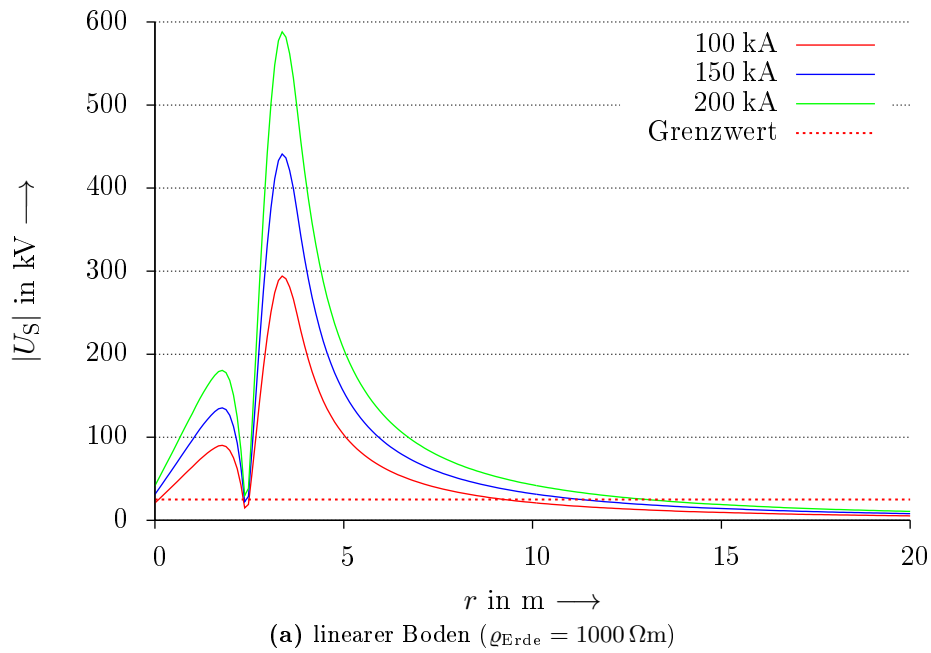


**Abbildung B.70.:** Maximal auftretende Schrittspannungen beim Einsatz von Bodenverbesserern mit der Schichtdicke  $d$  unter Fundamenterdern bei unterschiedlichen Gebäudegrößen und  $I = 150$  kA

## **B.4. Sonderfälle**

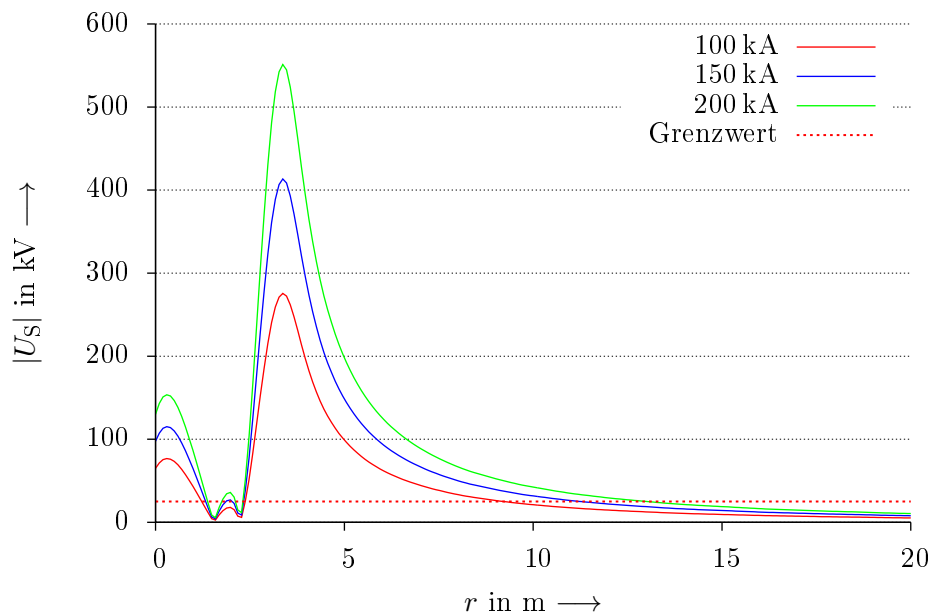
Die Graphen in diesem Abschnitt sind Ergänzungen zu den Simulationen von Praxis-Sonderfällen in Kapitel 9.

- Schutzhütte mit Ringerder: Seite 247
- Schutzhütte mit verschieden feinen Erdungsgittern: Seite 248–250
- Schutzhütte mit feinem Erdungsgitter und Tiefenerdern: Seite 251
- Vergleichende Darstellung der Erderkonfigurationen für  $I = 100 \text{ kA}$ : Seite 252

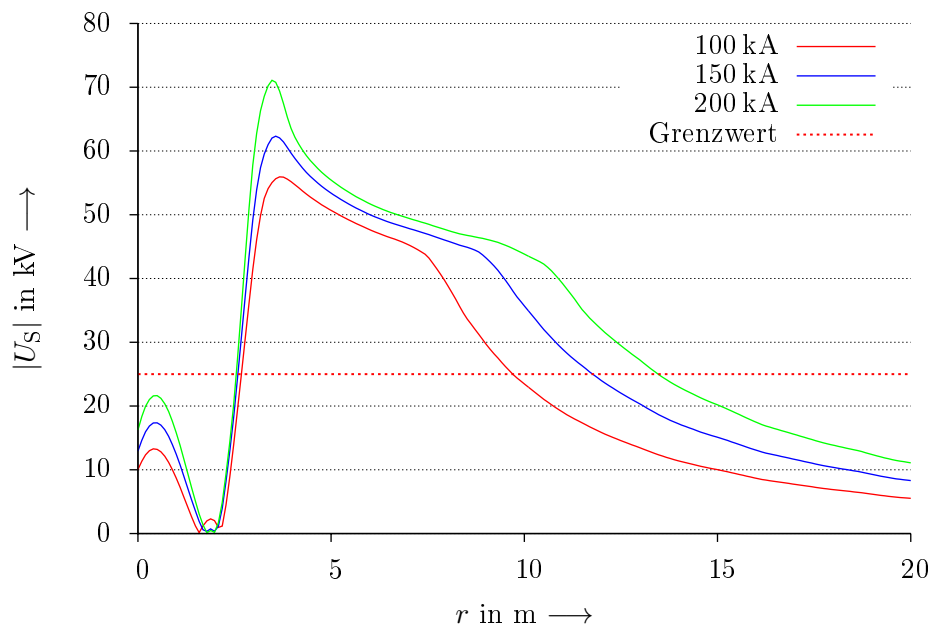


**Abbildung B.71.:** Schrittspannungen in und um eine(r) Schutzhütte bei Verwendung der Erdungsvariante „Ring“

## B. Zusätzliche Graphen



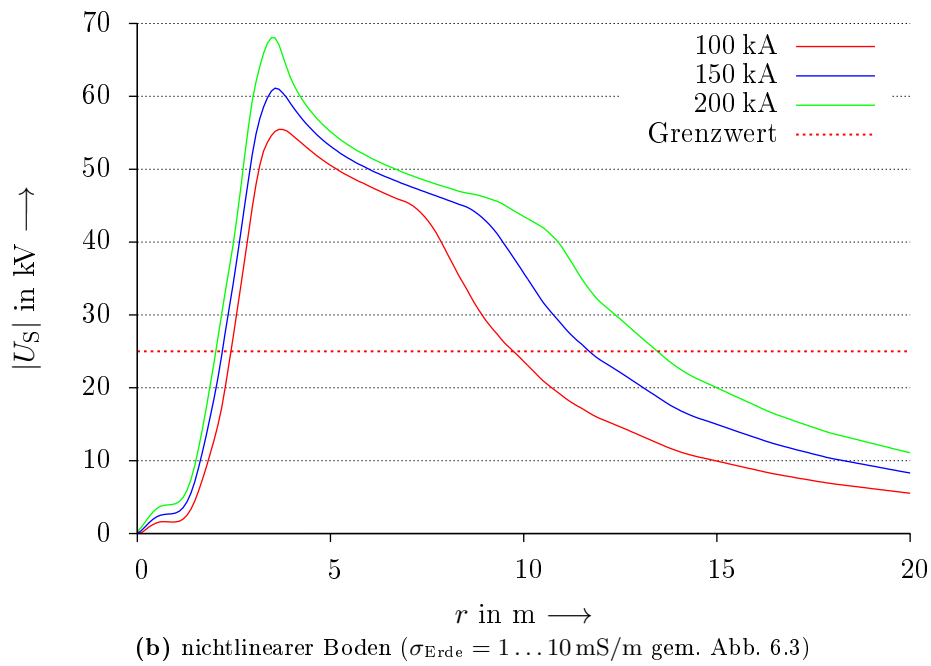
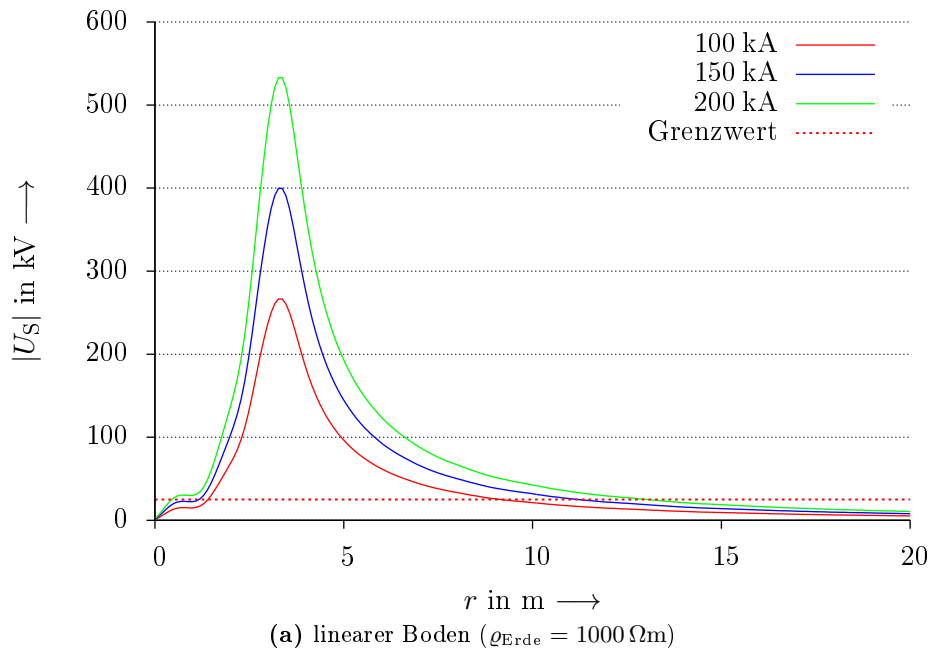
(a) linearer Boden ( $\rho_{\text{Erde}} = 1000 \Omega\text{m}$ )



(b) nichtlinearer Boden ( $\sigma_{\text{Erde}} = 1 \dots 10 \text{ mS/m}$  gem. Abb. 6.3)

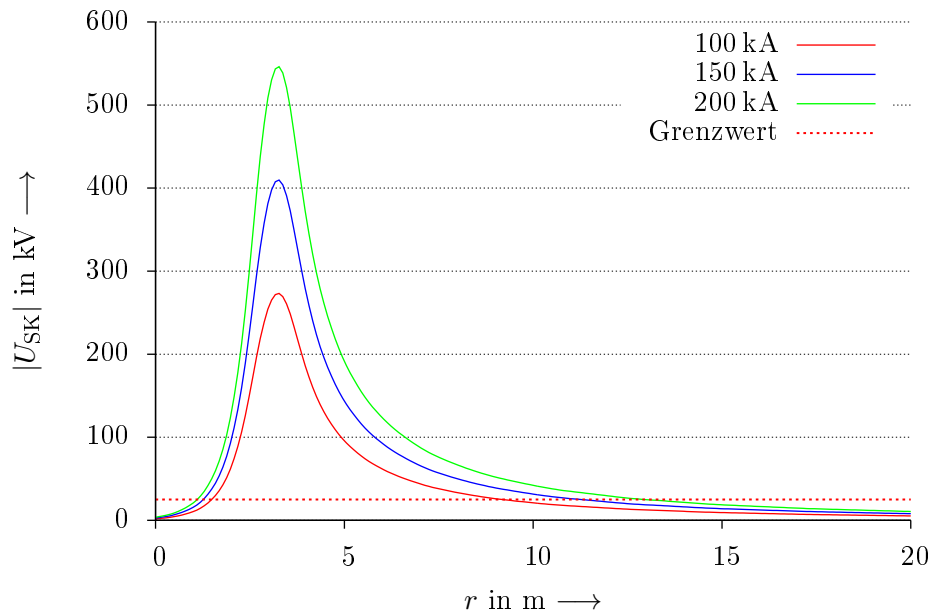
**Abbildung B.72.:** Schrittspannungen in und um eine(r) Schutzhütte bei Verwendung der Erdungsvariante „Kreuz“



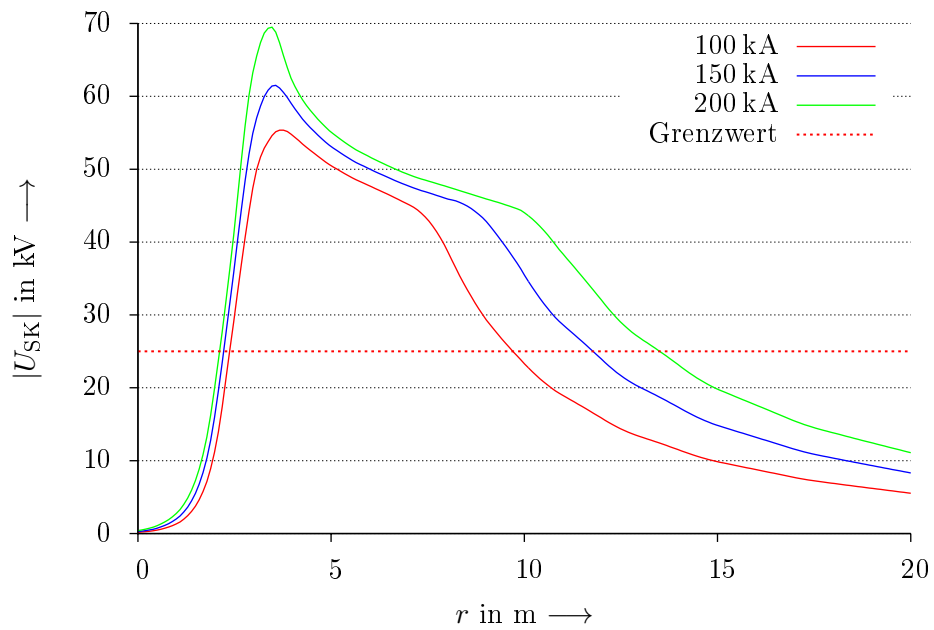


**Abbildung B.73.:** Schrittspannungen in und um eine(r) Schutzhütte bei Verwendung der Erdungsvariante „Gitter“

## B. Zusätzliche Graphen

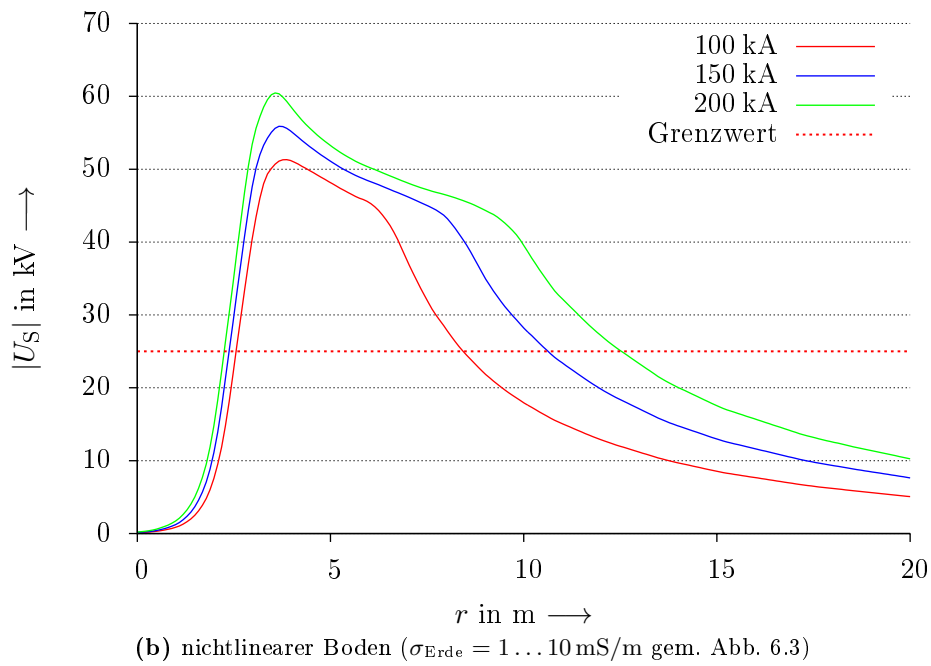
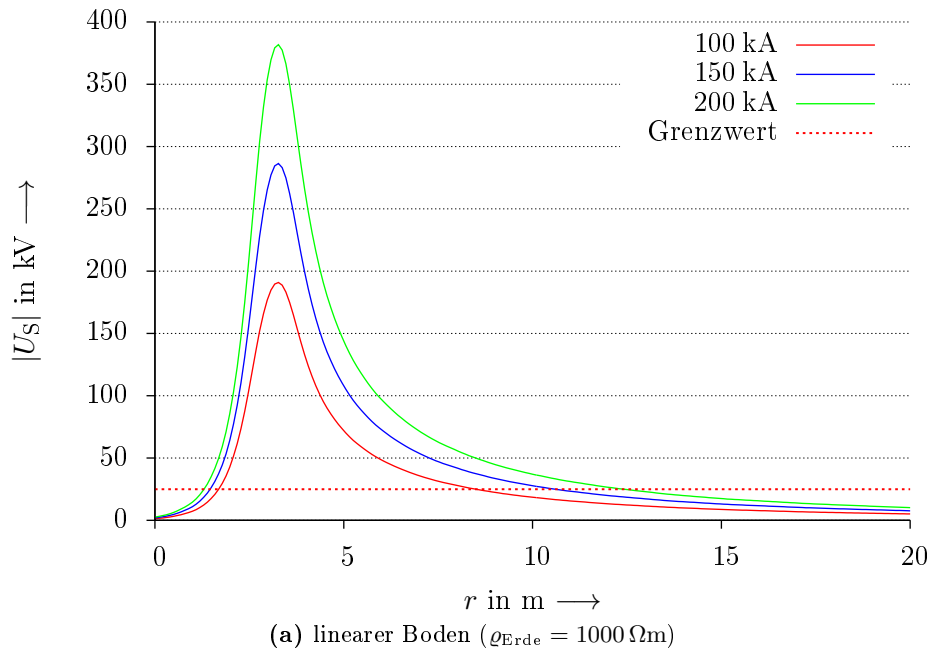


(a) linearer Boden ( $\rho_{Erde} = 1000 \Omega m$ )



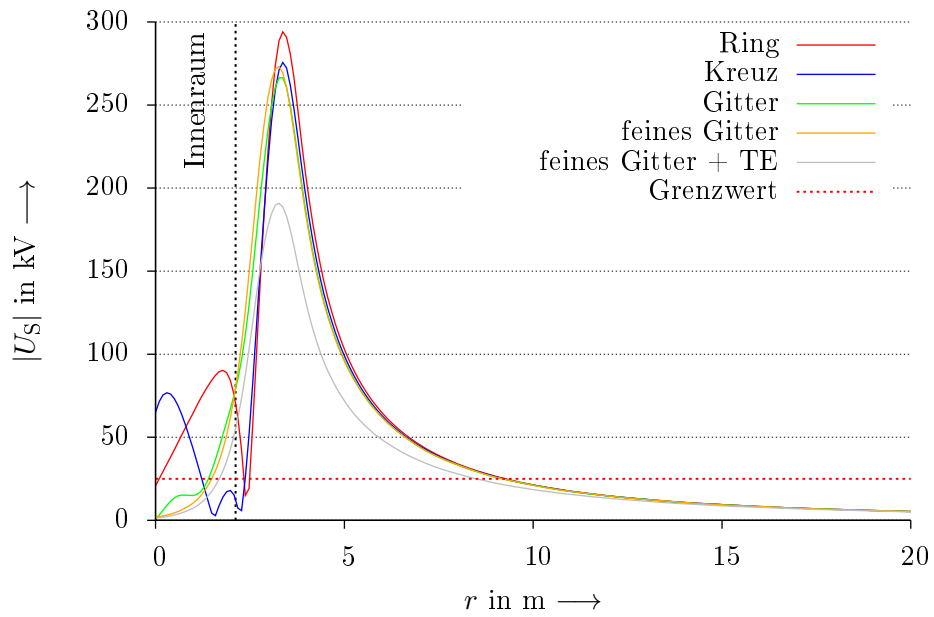
(b) nichtlinearer Boden ( $\sigma_{Erde} = 1 \dots 10 \text{ mS/m}$  gem. Abb. 6.3)

**Abbildung B.74.:** Schrittspannungen in und um eine(r) Schutzhütte bei Verwendung der Erdungsvariante „feines Gitter“

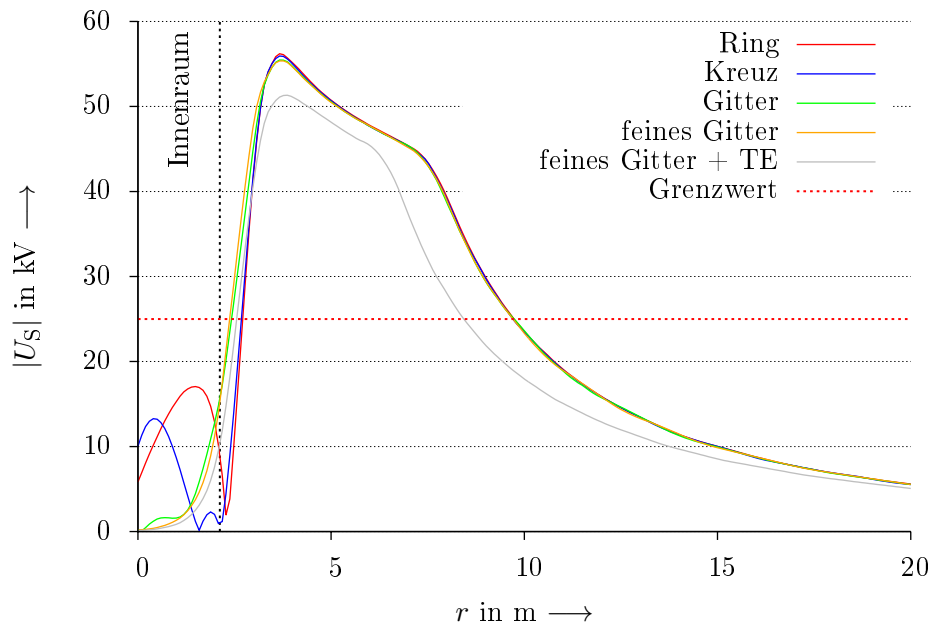


**Abbildung B.75.:** Schrittspannungen in und um eine(r) Schutzhütte bei Verwendung der Erdungsvariante „feines Gitter + TE“

## B. Zusätzliche Graphen



(a) linearer Boden ( $\rho_{\text{Erde}} = 1000 \Omega\text{m}$ )



(b) nichtlinearer Boden ( $\sigma_{\text{Erde}} = 1 \dots 10 \text{ mS/m}$  gem. Abb. 6.3)

**Abbildung B.76.:** Schrittspannungen in und um eine(r) Schutzhütte für  $I = 100 \text{ kA}$  bei Verwendung verschiedener Erderkonfigurationen

# Literaturverzeichnis

- [ABB08] AUSSCHUSS FÜR BLITZSCHUTZ UND BLITZFORSCHUNG (ABB) IM VDE (Hrsg.): *Überlegungen zum Blitzeinschlag auf dem Sportplatz in Wald-Michelbach am 08.08.2008*. Bericht.  
<http://www.vde.com/de/Ausschuesse/Blitzschutz/FAQ/bs/Documents/Blitzunfall-Wald-Michelbach.pdf>. Version: 2008, Abruf: 24. April 2013
- [ACDM92] ANDREWS, Christopher J. ; COOPER, Mary A. ; DARVENIZA, Mat ; MACKERRAS, David: *Lightning Injuries: Electrical, Medical, and Legal Aspects*. Boca Raton : CRC Press, 1992
- [Ack98] ACKERMAN, Michael J.: The Visible Human Project. In: *Proc IEEE* Vol. 86 (1998), März, Nr. 3, S. 504–511
- [AE80] ANDERSON, Ralph B. ; ERIKSSON, Andrew J.: Lightning Parameters for Engineering Application. In: *Electra* 4 (1980), Nr. 69, S. 65–102
- [AGS11] ASIMAKOPOULOU, Fani E. ; GONOS, Ioannis F. ; STATHOPOULOS, Ioannis A.: I-V Curves for the Determination of the Ionization Voltage in Soil Samples. In: *XVII International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2011)*. Hannover, August 2011
- [ALD13] *ALDIS – Austrian Lightning Detection & Information System*. Webseite. <http://www.aldis.at>. Version: 2013, Abruf: 18. Februar 2013
- [And93] ANDREWS, Christopher J.: *Studies in Aspects of Lightning Injury*, University of Queensland, PhD Thesis, 1993. – THE8269
- [Ant98] ANTONI, Hermann: Electrical Properties of the Heart. In: REILLY, J. P. (Hrsg.): *Applied Bioelectricity: From Electrical Stimulation to Electropathology*. New York Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 1998. – ISBN 0–387–98407–0, Kapitel 5, S. 148–193
- [ASAO08] ALÍPIO, Rafael S. ; SCHROEDER, Marco Aurélio O. ; AFONSO, Márcio M. ; OLIVEIRA, Tarcísio A. S.: A Discussion of Circuit Equivalents of a Vertical Ground Rod. In: *2008 International Conference on Grounding and Earthing (GROUND) & 3rd International Conference on Lightning Physics and Effects (LPE)*. Florianopolis, November 2008, S. 219–223

- [AV12] ALIPIO, Rafael ; VISACRO, Silverio: A Physical Model for the Frequency Dependence of Soil Conductivity and Permittivity. In: *2012 International Conference on Grounding and Earthing (GROUND) & 5th International Conference on Lightning Physics and Effects (LPE)*. Bonito, November 2012, S. 148–153
- [BAK75] BERGER, Karl ; ANDERSON, Ralph B. ; KRÖNINGER, H.: Parameters of Lightning Flashes. In: *Electra* 1 (1975), Nr. 41, S. 23–37
- [BBK78] BERGER, Karl ; BIEGELMEIER, Gottfried ; KAROBATH, Harald: Über die Wahrscheinlichkeit und den Mechanismus des Todes bei Blitzeinwirkungen. In: *Bull SEV* 69 (1978), April, Nr. 8, S. 361–366
- [Ber46] BERGER, Karl: Das Verhalten von Erdungen unter hohen Stoßströmen. In: *Bull SEV* (1946), April, Nr. 8, S. 197–211
- [BLI13] *BLIDS – Der Blitzinformationsdienst von Siemens*. Webseite. <http://www.blids.de>. Version: 2013, Abruf: 18. Februar 2013
- [BPB11] BARBOSA, Célio F. ; PAULINO, José Osvaldo S. ; BOAVENTURA, Wallace C.: Horizontal Electric Field at the Surface of Layered Earth due to Lightning. In: *2011 International Symposium on Lightning Protection (XI SIPDA)*. Fortaleza, Oktober 2011, S. 82–86
- [BWE13] BUNDESVERBAND WINDENERGIE (Hrsg.): *Anzahl der Windenergieanlagen in Deutschland*. Webseite. <http://www.wind-energie.de/infocenter/statistiken/deutschland/windenergieanlagen-deutschland>. Version: 2013, Abruf: 28. Februar 2013
- [CAH07] COOPER, Mary A. ; ANDREWS, Christopher J. ; HOLLE, Ronald L.: Lightning Injuries. In: AUERBACH, Paul S. (Hrsg.): *Wilderness Medicine*. 5th rev. ed. Mosby, 2007, Kapitel 3, S. 67–108
- [CGP10] CELLI, Gianni ; GHIANI, Emilio ; PILO, Fabrizio: Behaviour of Grounding Systems: A Quasi-Static EMTP Model and its Validation. In: *30. International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. Cagliari, September 2010
- [CKGA12] CHOUN, Lee W. ; KADIR, Mohd Zainal Abidin A. ; GOMES, Chandima ; AHMAD, Wan Fatinhamamah W.: Analysis of Earth Resistance of Electrodes and Soil Resistivity at Different Enviroments. In: *31. International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. Wien, September 2012
- [CMS<sup>+</sup>94] CHERINGTON, Michael ; MARTORANO, Francis J. ; SIEBUHR, La Verne ; STIEG, Richard L. ; YARNELL, Philip R.: Childhood lightning injuries on the playing field. In: *J Emerg Med* 12 (1994), S. 39–41

- [Coo80] COOPER, Mary A.: Lightning injuries: Prognostic signs for death. 9 (1980), Nr. 3, S. 134–138
- [Coo95] COOPER, Mary A.: Emergent Care of Lightning and Electrical Injuries. In: *Semin neurol* 15 (1995), September, Nr. 3, S. 268–278
- [Coo00] COOPER, Mary A.: A Fifth Mechanism of Lightning Injury. In: *Proc. 2000 ILDC – International Lightning Detection Conference*. Tucson, AZ, November 2000
- [Coo10] COORAY, Vernon (Hrsg.): *Lightning protection – The Institution of engineering and technology*. London : The Institution of Engineering and Technology, 2010. – ISBN 978-0-86341-744-3
- [DACM10] DIAZ, Oscar ; AREVALO, Liliana ; COORAY, Vernon ; MEJIA, Antonio: Electrical Breakdown in Soil Under Uniform Background Electric Fields. In: *2010 International Conference on Grounding and Earthing (GROUND) & 4th International Conference on Lightning Physics and Effects (LPE)*. Salvador, November 2010, S. 137–141
- [Dal72] DALZIEL, Charles F.: Electric shock hazard. In: *IEEE Spectrum* (1972), Februar, S. 41–50
- [Dav13] DAVIS, Timothy A.: *UMFPACK: unsymmetric multifrontal sparse LU factorization package*. Webseite.  
<http://www.cise.ufl.edu/research/sparse/umfpack/>.  
Version: April 2013, Abruf: 12. Mai 2013
- [DD97] DAVIS, Timothy A. ; DUFF, Iain S.: An Unsymmetric-Pattern Multifrontal Method for Sparse LU Factorization. In: *SIAM J Matrix Anal & Appl* 18 (1997), Januar, Nr. 1, S. 140–158
- [Deh07] DEHN + SÖHNE GMBH + CO. KG. (Hrsg.): *Blitzplaner*. 2., akt. Aufl. 2007. – ISBN 978-3-00-021115-7
- [DL68] DALZIEL, Charles F. ; LEE, William R.: Reevaluation of Lethal Electric Currents. In: *IEEE Trans Ind Gen Appl* IGA-4 (1968), Nr. 5, S. 467–476
- [DL69] DALZIEL, Charles F. ; LEE, William R.: Lethal Electric Currents. In: *IEEE Spectrum* (1969), Februar, S. 44–50
- [DLT41] DALZIEL, Charles F. ; LAGEN, John B. ; THURSTON, Joe L.: Electric Shock. In: *AIEE Trans* 60 (1941), Nr. 12, S. 1073–1078
- [DM50a] DALZIEL, Charles F. ; MANSFIELD, Thomas H.: Effect of Frequency on Perception Currents. In: *AIEE Trans* 69 (1950), Nr. 2, S. 1162–1168

- [DM50b] DALZIEL, Charles F. ; MANSFIELD, Thomas H.: Perception of Electric Currents. In: *Electr Eng* 69 (1950), September, Nr. 9, S. 794–800
- [DM56] DALZIEL, Charles F. ; MASSOGLIA, F. P.: Let-Go Currents and Voltages. In: *AIEE Trans* 75 (1956), Mai, Nr. 2, S. 49–56
- [DOA43] DALZIEL, Charles F. ; OGDEN, Eric ; ABBOTT, Curtis E.: Effect of Frequency on Let-Go Currents. In: *AIEE Trans* 62 (1943), Dezember, Nr. 12, S. 745–750
- [FKSW36] FERRIS, L. P. ; KING, B. G. ; SPENCE, P. W. ; WILLIAMS, H. B.: Effects of Electric Shock on the Heart. In: *AIEE Trans* 5 (1936), Mai, Nr. 5, S. 498–515
- [Fre34] FREIBERGER, Heinrich: *Der elektrische Widerstand des menschlichen Körpers gegen technischen Gleich- und Wechselstrom*, Technische Hochschule Berlin, Dissertation, 1934
- [Gao10a] GAO, Jing: *Discussion*. Dezember 2010. – Interner Bericht
- [Gao10b] GAO, Jing: *Stationary current calculation results*. Juni 2010. – Interner Bericht
- [Gao12a] GAO, Jing: *Generation of postured voxel-based human body models used for electromagnetic applications*, Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Theorie Elektromagnetischer Felder, Dissertation, 2012
- [Gao12b] GAO, Jing: *Results of the short lightning signal*. März 2012. – Interner Bericht
- [GLH<sup>+</sup>10] GUO, D. ; LATHI, Deepak ; HARID, Nouredine ; GRIFFITHS, Huw ; HADDAD, A. ; AINSLEY, A.: Experimental Investigations into the Performance of Large-scale Earthing electrodes. In: *2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. New Orleans, Oktober 2010, S. 465–468
- [Gre08] GRCEV, Leonid: Lightning Surge Characteristics of Earthing Electrodes. In: *29. International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. Uppsala, September 2008
- [GSA13] SINT INGEGNERIA (Hrsg.): *GSA Frequently asked questions (FAQ)*. Webseite. [http://www.sintingegneria.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=25&lang=en](http://www.sintingegneria.com/index.php?option=com_content&view=article&id=25&lang=en). Version: April 2013, Abruf: 25. April 2013
- [Hay11] HAYNES, William M.: *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 92. Aufl. Boca Raton : CRC Press, 2011



- [HGAH10] HADDAD, A. ; GRIFFITHS, Huw ; AHMEDA, Mohammad ; HARID, Nouredine: Experimental Investigations of The Impulse Characteristics of Practical Ground Electrode Systems. In: *2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. New Orleans, Oktober 2010, S. 469–472
- [HGH11] HARID, Nouredine ; GRIFFITHS, Huw ; HADDAD, A.: Effect of Ground Return Path on Impulse Characteristics of Earth Electrodes. In: *7. Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL) 2011*. Chengdu, November 2011, S. 686–689
- [Hol12] HOLLE, Ronald L.: Recent Studies of Lightning Safety and Demographics. In: *Proc. 31. ICLP – International Conference on Lightning Protection*. Wien, September 2012
- [Hol13] HOLZWORTH, Robert: *WWLLN – World Wide Lightning Location Network*. Webseite. <http://webflash.ess.washington.edu>. Version: 2013, Abruf: 18. Februar 2013
- [HS09] HEIDLER, Fridolin ; STIMPER, Klaus: *Blitz und Blitzschutz*. 1. Aufl. Berlin; Offenbach : VDE-Verlag, 2009 (VDE-Schrift 128). – ISBN 9783800729746
- [HW93] HASSE, Peter ; WIESINGER, Johannes: *Handbuch für Blitzschutz und Erdung*. 4., bearb. Aufl. München : Pflaum Verlag, 1993. – ISBN 3-7905-0657-5
- [ITU07] ITU-R (COMITÉ CONSULTATIF INTERNATIONAL DES RADIOCOMMUNICATIONS): *World Atlas of Ground Conductivities*. Recommendation 832. [http://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.832-1-199708-S!!PDF-E.pdf](http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.832-1-199708-S!!PDF-E.pdf). Version: 2007, Abruf: 20. Februar 2013
- [Jak08] JAKOV (WIKIMEDIA COMMONS): *Diagram of the human heart*. Webseite. [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diagram\\_of\\_the\\_human\\_heart\\_\(cropped\)\\_de.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diagram_of_the_human_heart_(cropped)_de.svg). Version: 2008, Abruf: 26. Februar 2013. – Lizenz: GFDL
- [JBRW74] JACOBSEN, J. ; BUNTENKÖTTER, S. ; REINHARD, H.J. ; WISSDORF, H.: Beitrag zur Übertragbarkeit der Gefährdung durch elektrische Ströme vom Modelltier Schwein auf den Menschen. In: *Dtsch Tierärztl Wschr* 81 (1974), Nr. 9, S. 214–220
- [KA00] KNABNER, Peter ; ANGERMANN, Lutz: *Numerik partieller Differentialgleichungen*. Berlin; Heidelberg : Springer Verlag, 2000. – ISBN 978-3-540-66231-0

- [Kat66] KATZ, Bernard: *Nerve, Muscle and Synapse*. New York : McGraw-Hill, 1966. – ISBN 0-07-033383-1
- [Kat05] KATZ, Arnold M.: *Physiology of the Heart*. 4th ed. Philadelphia, PA : Lippincott Williams & Williams, 2005
- [KFE87] KUPFER, Jürgen ; FUNKE, Klaus ; ERKENS, Reinhard: *Elektrischer Strom als Unfallursache*. 1. Aufl. Berlin : Verlag Tribüne, 1987
- [KKP11] KOMPACHER, Mario ; KINDERMANN, Gottfried ; PACK, Stephan: Blitzschlag in Personengruppe mit bisher nicht vorstellbaren Auswirkungen. In: *Proc. 9. VDE/ABB Blitzschutztagung*. Neu-Ulm, Oktober 2011
- [Koc51] KOCH, Walther: Die Potentialsteuerung bei Leitungsmasten. In: *ETZ* 72 (1951), November, Nr. 22, S. 651–655
- [Koc61] KOCH, Walther: *Erdungen in Wechselstromanlagen über 1 kV*. 3., neubearb. Aufl. Berlin; Göttingen, Heidelberg : Springer Verlag, 1961
- [KSJ00] KANDEL, Eric R. ; SCHWARTZ, James H. ; JESSELL, Thomas M.: *Principles of Neural Science*. 4th ed. New York : McGraw-Hill, 2000. – ISBN 0-8385-7701-6
- [KTIO85] KITAGAWA, N. ; TURUMI, S. ; ISHIKAWA, T. ; OHASHI, M.: The Nature of Lightning Charges on Human Bodies and the Basis for Safety and Protection. In: *18. International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. München, 1985, S. 435–438
- [Küc05] KÜCHLER, Andreas: *Hochspannungstechnik: Grundlagen – Technologie – Anwendungen*. 2., vollst. bearb. und erw. Aufl. Berlin; Heidelberg : Springer Verlag, 2005
- [Kup71] KUPFER, Jürgen: Technische Darstellung einer Methode zur reizeinbruchsfreien Registrierung des Elektrokardiogramms bei elektrischer Durchströmung des Herzens am Ganztier. In: *Biomed Tech* 16 (1971), Nr. 3, S. 109–115
- [Kup81] KUPFER, Jürgen: *Experimentelle Untersuchungen zur Wirkung kurzer (20 ms bis 1500 ms) 50-Hz-Wechselströme auf Großtiere (Schweine) mit dem Ziel der Ableitung von Grenzwerten für Körperströme für Mensch und Nutztier*, Technische Universität Dresden, Dissertation B, 1981
- [LA07] LEVY, Deborah R. ; AKIYAMA, Toshio: Lightning-induced ventricular fibrillation. In: *Cardiol J* 14 (2007), Nr. 1, S. 91–94

- [LFMD83] LEADON, R. E. ; FLANAGAN, T. M. ; MELLON, C. E. ; DENSON, R.: Effect of ambient gas on arc initiation characteristics in soil. In: *IEEE Trans Nucl Sci* NS-30 (1983), Dezember, Nr. 6, S. 4572–4576
- [LH95] LÓPEZ, Raúl E. ; HOLLE, Ronald L.: Demographics of Lightning Casualties. In: *Semin neurol* 15 (1995), September, Nr. 3, S. 286–295
- [LTGT03] LIU, Yaqing ; THEETHAYI, Nelson ; GONZALER, Raul M. ; THOTTAPPILLIL, Rajeev: The Residual Resistivity in Soil Ionization Region Around Grounding System for Different Experimental Results. In: *2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (IEEE EMC)* Bd. 2. Boston, August 2003, S. 794–799
- [MGHH12a] MOUSA, Salah ; GRIFFITHS, Huw ; HARID, Nouredine ; HADDAD, A.: Current Distribution under High Frequency and Transient Conditions in Earth Electrode Systems. In: *2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*. Shanghai, September 2012, S. 150–153
- [MGHH12b] MOUSA, Salah ; GRIFFITHS, Huw ; HARID, Nouredine ; HADDAD, A.: Experimental Investigation of High Frequency and Transient Performance of Earth Rod Systems. In: *31. International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. Wien, September 2012
- [MHGH10] MGHAIABI, Ahmed E. ; HARID, Nouredine ; GRIFFITHS, Huw ; HADDAD, A.: A New Method to Increase the Effective Length of Horizontal Earth Electrodes. In: *45. Universities Power Engineering Conference (UPEC) 2010*. Cardiff, September 2010
- [MHS09] MANHARDT, Michael ; HEIDLER, Fridolin ; STIMPER, K.: Blitzstrom-Messstation auf dem Hohen Peißenberg. In: *8. VDE/ABB-Blitzschutztagung*. Neu-Ulm : VDE-Verlag, Oktober 2009, S. 45–49
- [MHS11] MANHARDT, Michael ; HEIDLER, Fridolin ; STIMPER, K.: Blitzstrom- und Blitzfeld-Messungen am Fernmeldeturm auf dem Hohen Peißenberg. In: *9. VDE/ABB-Blitzschutztagung*. Neu-Ulm : VDE-Verlag, Oktober 2011, S. 64–68
- [MM12] MATA, Carlos T. ; MATA, Angel G.: Calculating the Lightning Protection System Downconductors' Grounding Resistance at Launch Complex 39B, Kennedy Space Center, Florida. In: *31. International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. Wien, September 2012
- [Mou94] MOUSA, Abdul M.: The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents into Concentrated Electrodes. In: *IEEE Trans Power Del* 9 (1994), Juli, Nr. 3, S. 1669–1677

- [MVM01] MUEHLBERGER, Thomas ; VOGT, Peter M. ; MUNSTER, Andrew: The long-term consequences of lightning injuries. In: *Burns* 27 (2001), S. 829–833
- [Neu71] NEUHAUS, Hermann: Personenblitzschutz gegen Schrittspannungen und Berührungsspannungen. In: *11. Internationale Blitzschutzkonferenz (ICLP)*. München, 1971
- [Neu83] NEUHAUS, Hermann: *Blitzschutzanlagen: Erl. zu DIN 57 185/VDE 0185*. 1. Aufl. Berlin; Offenbach : VDE-Verlag, 1983 (VDE-Schrift 44). – ISBN 3–8007–1303–9
- [NHG06] NOR, N. M. ; HADDAD, A. ; GRIFFITHS, Huw: Characterization of Ionization Phenomena in Soils Under Fast Impulses. In: *IEEE Trans Power Del* 21 (2006), S. 353–361
- [Nix06] NIXON, Kenneth J.: *The Lightning Transient Behavior of a Driven Rod Earth Electrode in Multi-Layer Soil*, University of Witwatersrand, Dissertation, Juli 2006
- [Nor06] NOR, N. M.: Review: Soil Electrical Characteristics Under High Impulse Currents. In: *IEEE Trans Electromagn C* 48 (2006), November, Nr. 4, S. 826–829
- [Osy62] OSYPKA, Peter: *Meßtechnische Untersuchungen über Stromstärke, Einwirkungsdauer und Stromweg bei elektrischen Wechselstromunfällen an Mensch und Tier – Bedeutung und Auswertung für Starkstromanlagen*, Technische Hochschule Braunschweig, Dissertation, 1962. – (Abgedruckt in [Osy63a] und [Osy63b])
- [Osy63a] OSYPKA, Peter: Meßtechnische Untersuchungen über Stromstärke, Einwirkungsdauer und Stromweg bei elektrischen Wechselstromunfällen an Mensch und Tier – Bedeutung und Auswertung für Starkstromanlagen (1. Teil). In: *Elektromedizin* 8 (1963), Nr. 3, S. 153–170
- [Osy63b] OSYPKA, Peter: Meßtechnische Untersuchungen über Stromstärke, Einwirkungsdauer und Stromweg bei elektrischen Wechselstromunfällen an Mensch und Tier – Bedeutung und Auswertung für Starkstromanlagen (Schluß). In: *Elektromedizin* 8 (1963), Nr. 4, S. 193–214
- [P<sup>+</sup>63] PELEŠKA, Bohumil u. a.: Cardiac Arrhythmias Following Condenser Discharges and Their Dependence Upon Strength of Current and Phase of Cardiac Cycle. In: *Circ Res* XIII (1963), Juli

- [P<sup>+</sup>65] PELEŠKA, Bohumil u. a.: Cardiac Arrhythmias Following Condenser Discharges Led Through an Inductance: Comparison with Effects of Pure Condenser Discharges. In: *Circ Res* XVI (1965), Januar
- [PSAV10] PEDROSA, Adriana G. ; SCHROEDER, Marco A. O. ; ALÍPIO, Rafael S. ; VISACRO, Silério: Influence of Frequency-Dependent Soil Electrical Parameters on the Grounding Response to Lightning. In: *30. International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. Cagliari, September 2010
- [Rei98] REILLY, J. P.: *Applied Bioelectricity: From Electrical Stimulation to Electropathology*. New York Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 1998. – ISBN 0-387-98407-0
- [Roc12] ROCK, Michael: *Prüfgeneratoren zur Simulation von Blitzimpulsströmen im Labor und ihre Wechselwirkung mit den Prüfobjekten*, Technische Universität Ilmenau, Habilitationsschrift, 2012
- [Rot12a] ROTH, Anna-Lena: Tödlicher Blitzschlag: Golfspielerin kämpft um ihr Leben. In: *Spiegel Online* (2012), Juni.  
<http://www.spiegel.de/panorama/blitzschlag-auf-golfplatz-in-waldeck-vierte-frau-kaempft-um-leben-a-841881.html>, Abruf: 01. März 2013
- [Rot12b] ROTH, Anna-Lena: Tödlicher Blitzschlag: Vierte Golfspielerin erliegt ihren Verletzungen. In: *Spiegel Online* (2012), Juli.  
<http://www.spiegel.de/panorama/blitz-auf-golfplatz-in-waldeck-vierte-frau-stirbt-a-842435.html>, Abruf: 01. März 2013
- [RU03] RAKOV, Vladimir A. ; UMAN, Martin A.: *Lightning: physics and effects*. Cambridge : Cambridge University Press, 2003. – ISBN 0-521-58327-6
- [Sam65] SAM, Ulrich: *Untersuchungen über die elektrische Gefährdung des Menschen bei Teildurchströmungen, insbesondere bei Arbeiten in Kesseln, Behältern und Rohrleitungen*, Technische Hochschule Braunschweig, Dissertation, Mai 1965. – (Abgedruckt in [Sam66], [Sam67a] und [Sam67b])
- [Sam66] SAM, Ulrich: Untersuchungen über die elektrische Gefährdung des Menschen bei Teildurchströmungen, insbesondere bei Arbeiten in Kesseln, Behältern und Rohrleitungen (1. Teil). In: *Elektromedizin* 11 (1966), Nr. 4, S. 193–212

- [Sam67a] SAM, Ulrich: Untersuchungen über die elektrische Gefährdung des Menschen bei Teildurchströmungen, insbesondere bei Arbeiten in Kesseln, Behältern und Rohrleitungen (2. Teil). In: *Elektromedizin* 12 (1967), Nr. 1, S. 29–37
- [Sam67b] SAM, Ulrich: Untersuchungen über die elektrische Gefährdung des Menschen bei Teildurchströmungen, insbesondere bei Arbeiten in Kesseln, Behältern und Rohrleitungen (Schluß). In: *Elektromedizin* 12 (1967), Nr. 3, S. 102–114
- [SAO08] SCHROEDER, Marco Aurélio O. ; AFONSO, Márcio M. ; OLIVEIRA, Tarcísio A. S.: Electromagnetic Fields of Buried Conductors. In: *2008 International Conference on Grounding an Earthing (GROUND) & 3rd International Conference on Lightning Physics and Effects (LPE)*. Florianopolis, November 2008, S. 399–402
- [SB11] SCHEIBE, Klaus ; BIRK, Christian: Blitzstrommessungen für künftige Offshore-Windparks in der Nordsee. In: *9. VDE/ABB-Blitzschutztagung*. Neu-Ulm : VDE-Verlag, Oktober 2011, S. 69–75
- [SBS09] SCHEIBE, Klaus ; BIRK, Christian ; SCHMARBECK, Sven: Blitzstrommessungen für künftige Offshore-Windparks in der Nordsee. In: *8. VDE/ABB-Blitzschutztagung*. Neu-Ulm : VDE-Verlag, Oktober 2009, S. 51–56
- [SK71] STIEGLITZ, R. ; KUPFER, Jürgen: Elektrokardiographische Veränderungen bei elektrischer Durchströmung des Herzens verschiedener Nagetiere mit sinusförmigem Wechselstrom. In: *Biomed Tech* 16 (1971), Nr. 4, S. 133–139
- [SP08] SALARI, Joao C. ; PORTELA, Carlos: A Discussion of Circuit Equivalents of a Vertical Ground Rod. In: *2008 International Conference on Grounding an Earthing (GROUND) & 3rd International Conference on Lightning Physics and Effects (LPE)*. Florianopolis, November 2008, S. 219–223
- [SWR06] STÜTZ, Nicolaus ; WEISS, D. ; REICHERT, Bert: Verletzung durch Blitzschlag. Fallbeschreibung eines 17-jährigen Patienten und kurze Literaturübersicht. 109 (2006), S. 495–498
- [TSS04] TUMA, Eduardo T. ; SANTOS., Ronaldo O. ; SOBRINHO, Carlos L.: Transient Analysis of Parameters Governing Grounding Systems by the FDTD Method. In: *2004 International Conference on Grounding an Earthing (GROUND) & 1st International Conference on Lightning Physics and Effects (LPE)*. Belo Horizonte, November 2004, S. 165–169

- [VAVA10] VISACRO, Silverio ; ALIPIO, Rafael ; VALE, Maria Helena M. ; ARAÚJO, Listz S.: Recent Findings in Soil Parameter Frequency Dependence and Their Influence on the Lightning Response of Grounding Electrodes. In: *2010 International Conference on Grounding and Earthing (GROUND) & 4th International Conference on Lightning Physics and Effects (LPE)*. Salvador, November 2010, S. 119–122
- [VHP12] *The National Library of Medicine's Visible Human Project*. Webseite. [http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible\\_human.html](http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html). Version: April 2012, Abruf: 16. Februar 2013
- [Wia11] WIATER, Jarosław: Step voltage nearby tree for surge current excitation. In: *XXI International Conference on Electromagnetic Disturbances*, 2011
- [WZHY12] WU, Jinpeng ; ZHANG, Bo ; HE, Jinliang ; YU, Shaofeng: Optimal Position for Driven Rod of Combined Vertical and Horizontal Grounding Electrodes under Lightning. In: *31. International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. Wien, September 2012
- [YF10] YASUDA, Yoh ; FUJII, Toshiaki: Equivalent Equation of Earth Resistance for Ring Electrode of Wind Turbine. In: *30. International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. Cagliari, September 2010
- [YRHA73] YOUNOSSI, K. ; RÜDIGER, H. J. ; HAAP, Kp. ; ANTONI, H.: Untersuchungen über die Flimmerschwelle des isolierten Meerschweinchen-Herzens für Gleichstrom und sinusförmigen Wechselstrom. In: *Basic Res Cardiol* 68 (1973), S. 551–568
- [YYU11] YAMAMOTO, K. ; YANAGAWA, S. ; UEDA, T.: Verification of Transient Grounding Impedance Measurements of a Wind Turbine Generator System Using the FDTD method. In: *2011 International Symposium on Lightning Protection (XI SIPDA)*. Fortaleza, Oktober 2011, S. 255–260
- [ZRP09] ZACK, Fred ; RUMMEL, Jörg ; PÜSCHEL, Klaus: Blitzschläge auf Fußballplätzen. Eine unterschätzte Gefahr. In: *Rechtsmedizin* 19 (2009), S. 77–82
- [ZRW07] ZACK, Fred ; ROTHSCILD, Markus A. ; WEGENER, Rudolf: Blitzunfall. Energieübertragungsmechanismen und medizinische Folgen. In: *Dtsch Arztebl* 104 (2007), S. A3545–A3549
- [ZSW04] ZACK, Fred ; SCHNIERS, Esther ; WEGENER, Rudolf: Vorschlag einer Klassifizierung der verschiedenen Energieübertragungen auf den Menschen. In: *Rechtsmedizin* 14 (2004), S. 396–404





# Relevante Normen

- [DIN18014] Norm DIN 18014:2007-09 September 2007. *Fundamentender – Allgemeine Planungsgrundlagen*
- [EN62305-1] Norm DIN EN 62305-1 (VDE 0185-305-1):2011-10 Oktober 2011. *Blitzschutz – Teil 1: Allgemeine Grundsätze*
- [EN62305-1BR1] Norm DIN EN 62305-1 Berichtigung 1 (VDE 0185-305-1 Berichtigung 1):2012-03 März 2012. *Blitzschutz – Teil 1: Allgemeine Grundsätze. Berichtigung zu DIN EN 62305-1 (VDE 0185-305-1):2011-10*
- [EN62305-2] Norm DIN EN 62305-2 (VDE 0185-305-2):2013-02 Februar 2013. *Blitzschutz – Teil 2: Risiko-Management*
- [EN62305-2BB1] Norm DIN EN 62305-2 Beiblatt 1 (VDE 0185-305-2 Beiblatt 1): 2013-02 Februar 2013. *Blitzschutz – Teil 2: Risiko-Management – Beiblatt 1: Blitzgefährdung in Deutschland*
- [EN62305-2BB2] Norm DIN EN 62305-2 Beiblatt 2 (VDE 0185-305-2 Beiblatt 2): 2013-02 Februar 2013. *Blitzschutz – Teil 2: Risiko-Management – Beiblatt 2: Berechnungshilfe zur Abschätzung des Schadensrisikos für bauliche Anlagen, mit CD-ROM*
- [EN62305-3] Norm DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3):2011-10 Oktober 2011. *Blitzschutz – Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen*
- [EN62305-3BB1] Norm DIN EN 62305-3 Beiblatt 1 (VDE 0185-305-3 Beiblatt 1): 2012-10 Oktober 2012. *Blitzschutz – Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen – Beiblatt 1: Zusätzliche Informationen zur Anwendung der DIN EN 62305-3 (VDE 0185-305-3)*
- [EN62305-3BB2] Norm DIN EN 62305-3 Beiblatt 2 (VDE 0185-305-3 Beiblatt 2): 2012-10 Oktober 2012. *Blitzschutz – Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen – Beiblatt 2: Zusätzliche Informationen für besondere bauliche Anlagen*
- [EN62305-3BB3] Norm DIN EN 62305-3 Beiblatt 3 (VDE 0185-305-3 Beiblatt 3): 2012-10 Oktober 2012. *Blitzschutz – Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen – Beiblatt 3: Zusätzliche Informationen für die Prüfung und Wartung von Blitzschutzsystemen*

## Relevante Normen

- [EN62305-3BB4] Norm DIN EN 62305-3 Beiblatt 4 (VDE 0185-305-3 Beiblatt 4): 2008-01 Januar 2008. *Blitzschutz – Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen – Beiblatt 4: Verwendung von Metalldächern in Blitzschutzsystemen*
- [EN62305-3BB5] Norm DIN EN 62305-3 Beiblatt 5 (VDE 0185-305-3 Beiblatt 5): 2009-10 Oktober 2009. *Blitzschutz – Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen – Beiblatt 5: Blitz- und Überspannungsschutz für PV Stromversorgungssysteme*
- [EN62305-4] Norm DIN EN 62305-4 (VDE 0185-305-4):2011-10 Oktober 2011. *Blitzschutz – Teil 4: Elektrische und elektronische Systeme in baulichen Anlagen*
- [EN62305-4BB1] Norm DIN EN 62305-4 Beiblatt 1 (VDE 0185-305-4 Beiblatt 1): 2012-10 Oktober 2012. *Blitzschutz – Teil 4: Schutz von baulichen Anlagen und Personen – Beiblatt 1: Verteilung des Blitzstroms*
- [IEC60479-1] IEC/TS 60479-1 ed4.0 (2005-07): *Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects*. Juli 2005
- [IEC60479-2] IEC/TS 60479-2, ed3.0 (2007-05): *Effects of current on human beings and livestock – Part 2: Special aspects*. Mai 2007
- [IEC60479-3] IEC/TR 60479-3, ed1.0 (1998-09): *Effects of current on human beings and livestock – Part 3: Effects of current passing through the body of livestock*. September 1998
- [IEC60479-4] IEC/TR 60479-4, ed2.0 (2011-10): *Effects of current on human beings and livestock – Part 4: Effects of lightning strokes*. Oktober 2011
- [IEC60479-5] IEC/TR 60479-5, ed1.0 (2007-11): *Effects of current on human beings and livestock – Part 5: Touch voltage threshold values for physiological effects*. November 2007
- [IEEE80] Norm IEEE Std 80-2000 Januar 2000. *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*
- [VDE0101-1] Norm DIN EN 61936-1 (VDE 0101-1):2011-11 November 2011. *Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV – Teil 1: Allgemeine Bestimmungen*
- [VDE0101-2] Norm DIN EN 50522 (VDE 0101-2):2011-11 November 2011. *Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV – Teil 1: Allgemeine Bestimmungen*
- [VDE0140-479-1] Vornorm DIN V VDE V 0140-479-1:2007-05 Mai 2007. *Wirkung des Stromes auf Menschen und Nutztiere – Teil 1: Allgemeine Aspekte (IEC TR 60479-1:2005)*

- [VDE0140-479-3] Vornorm DIN V VDE V 0140-479-4:2001-04 April 2001. *Wirkung des Stromes auf Menschen und Nutztiere – Teil 3: Wirkungen von Strömen durch den Körper von Nutztieren (IEC TR 60479-3:1998)*
- [VDE0140-479-4] Vornorm DIN V VDE V 0140-479-4:2005-10 Oktober 2005. *Wirkung des Stromes auf Menschen und Nutztiere – Teil 4: Wirkungen von Blitzschlägen auf Menschen und Nutztiere (IEC TR 60479-4:2004)*



# Lebenslauf

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.



# Veröffentlichungen

- [1] BROCKE, Ralph ; HINRICHSSEN, Volker ; SUCHANEK, Sebastian ; GAO, Jing: Step-voltage-optimized Lightning Protection earth-termination systems analysis and simulation. In: *2011 International Symposium on Lightning Protection (XI SIPDA)*. Fortaleza, Oktober 2011, S. 272–277
- [2] SUCHANEK, Sebastian ; HINRICHSSEN, Volker ; BROCKE, Ralph ; MÜLLER, Klaus-Peter: Simulation und Optimierung von Blitzschutzerdungsanlagen unter Schrittspannungsaspekten. In: *Dresdner Blitzschutztagung*. Dresden, September 2010
- [3] SUCHANEK, Sebastian ; HINRICHSSEN, Volker ; BROCKE, Ralph ; MÜLLER, Klaus-Peter: Simulation of Earth Termination Systems for Lightning Protection Systems regarding Step Voltages. In: *XVII International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2011)*. Hannover, August 2011
- [4] SUCHANEK, Sebastian ; HINRICHSSEN, Volker ; BROCKE, Ralph ; MÜLLER, Klaus-Peter: Simulation von Blitzschutz-Erdungsanlagen unter Schrittspannungsaspekten – praktische Umsetzung. In: *9. VDE/ABB-Blitzschutztagung*. Neu-Ulm : VDE-Verlag, Oktober 2011
- [5] SUCHANEK, Sebastian ; HINRICHSSEN, Volker ; BROCKE, Ralph ; MÜLLER, Klaus-Peter: Investigations of Earth Termination Systems With Respect to Optimised Step Voltages. In: *31. International Conference on Lightning Protection (ICLP)*. Wien, September 2012
- [6] SUCHANEK, Sebastian ; HINRICHSSEN, Volker ; GAO, Jing ; MUNTEANU, Irina ; BROCKE, Ralph ; MÜLLER, Klaus-Peter: Auswirkungen von Schrittspannungen auf den Menschen. In: *9. VDE/ABB-Blitzschutztagung*. Neu-Ulm : VDE-Verlag, Oktober 2011
- [7] SUCHANEK, Sebastian ; HINRICHSSEN, Volker ; GAO, Jing ; MUNTEANU, Irina ; BROCKE, Ralph ; MÜLLER, Klaus-Peter: Simulation of Earth Termination Systems under Consideration of Step Voltages. In: *XIV ICAE – International Conference on Atmospheric Electricity*. Rio de Janeiro, August 2011
- [8] SUCHANEK, Sebastian ; MÜLLER, Klaus-Peter ; HINRICHSSEN, Volker ; BROCKE, Ralph ; GAO, Jing ; MUNTEANU, Irina: Optimierung der Blitzschutzerdung unter Schrittspannungsaspekten. In: *ETZ* (2011), Nr. 1–2, S. 46–49





## Erklärung laut § 9 PromO

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Dissertation allein und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur verfasst habe. Die Arbeit hat bisher noch nicht zu Prüfungszwecken gedient.

Stockstadt/Main, 15.06.2013